# De natuurkunde van 't vrije veld. Deel I

## Licht en kleur in het landschap

**Marcel Minnaert**

**bron**
Marcel Minnaert, *De natuurkunde van 't vrije veld. Deel I. Licht en kleur in het landschap*. W.J. Thieme, Zutphen 1937

Zie voor verantwoording: http://www.dbnl.org/tekst/minn004natu01_01/colofon.htm





## Voorwoord

Wie houdt van de natuur neemt haar verschijnselen waar zoals hij ademt en leeft: uit een aangeboren, diepe drang. Zonneschijn en regen, warmte en koude, zijn hem even welkome gelegenheden tot opmerken, hij vindt zijn gading in de stad en in het bos, in de zandvlakte en op de zee. Ieder ogenblik wordt hij getroffen door nieuwe en belangwekkende gebeurtenissen. Met veerkrachtige stap zwerft hij over de wijde landen, oog en oor klaar tot het opnemen van de indrukken die van alle kanten op hem aankomen, diep inademend de geur der lucht, voelend elk temperatuurverschil, met de hand soms strelend een struik langs de weg, om in nauwere aanraking te zijn met de dingen der Aarde. Zo voelt hij zich een mens in levensvolheid.

Denk niet dat de oneindig verscheiden stemmingen der natuur voor den wetenschappelijken waarnemer iets van hun dichterlijkheid verliezen: door de gewoonte van het opmerken wordt ons schoonheidsgevoel verfijnd, en rijker gekleurd de stemmingsachtergrond waarop zich de afzonderlijke feiten aftekenen. De samenhang tussen de gebeurtenissen, het verband van oorzaak en gevolg tussen de onderdelen van het landschap, maken een harmonisch geheel van wat anders slechts een aaneenschakeling zou zijn van losse beelden.

De hier beschreven verschijnselen zijn voor een gedeelte dingen die u dagelijks waarneemt, en waarvan het leuk is de natuurkundige inhoud naar voren te brengen. Voor een ander gedeelte zijn het verschijnselen die u niet kent, en die toch elk ogenblik te zien zijn; het is voldoende uw ogen aan te raken met de toverstaf die heet: ‘weten waar ik op letten moet’! En tenslotte zijn er ook de zeldzame, merkwaardige natuurwonderen, die zelfs voor den geschoolden waarnemer maar enkele malen in het leven voorkomen, waar hij jaren op wacht, en waarvan het zien ons vervult met het bewustzijn van het buitengewone en met een diep geluk. Hoe merkwaardig het ook moge schijnen, toch is het een feit dat men niet veel anders opmerkt dan de dingen die men al kent; het is heel moeilijk iets nieuws te zien, ook al vertoont het zich rechtstreeks voor onze ogen. Gedurende

de oudheid en de middeleeuwen heeft men talloze zonsverduisteringen waargenomen, en toch heeft het geduurd tot 1842 eer de corona werd opgemerkt, die wij thans als het meest opvallende eklipsverschijnsel beschouwen en die iedereen met het blote oog kan zien. Wat in den loop van de tijd door de arbeid van vele uitstekende natuurkenners opgetekend is, heb ik getracht in dit boek te verenigen om er uw aandacht op te vestigen. Er is geen twijfel aan dat er nog veel, veel meer in de natuur te zien valt; elk jaar verschijnt weer een aantal nieuwe verhandelingen over nog onopgemerkte verschijnselen; en het is wel vreemd te bedenken, dat wij voor zoveel dingen doof en blind blijven die ons aan alle kanten omringen en die door het nageslacht wèl opgemerkt zullen worden.

Onder ‘natuurwaarnemingen’ verstaat men gewoonlijk de bestudering van planten en dieren; alsof niet ook tot de natuur behoorde het schouwspel van wind en weer en wolken, de duizenden geluiden die de ruimte vervullen, de watergolven, de zonnestralen, de dreuningen der aarde! Zoals de biologen hun flora's en fauna's hebben, moeten de natuurkundigen in het bezit zijn van een wandel- en waarnemingsboek over alles wat er op hun gebied te zien is aan de ‘levenloze’ natuur in onze Nederlandse gewesten. Wij komen onvermijdelijk op het gebied van den meteoroloog, maar ook op grensgebieden van de sterrekunde, de aardrijkskunde, de biologie, de techniek; toch hoop ik een zekere eenheid gevonden te hebben, waardoor men de samenhang van al de behandelde onderwerpen voelt.

Omdat het ons te doen is om eenvoudige, rechtstreekse natuurwaarneming, laten we stelselmatig weg:

1. alles wat alleen met instrumenten te voorschijn komt (daarentegen is enige aandacht besteed aan onze zintuigen, die onze voornaamste hulpmiddelen zullen uitmaken en wier eigenschappen we dus moeten kennen);
2. alles wat uit lange statistische reeksen waarnemingen wordt afgeleid;
3. de theoretische bespiegelingen, voor zover ze niet rechtstreeks aansluiten bij wat onze ogen zien.

Het zal blijken, dat er dan nog een verrassende overvloed van waarnemingen overblijft; ja, er is nauwelijks één enkel gebied van de natuurkunde, of het vindt zijn toepassing in de open lucht, en dikwijls op een wijze die in grootsheid al onze laboratoriumproeven overtreft. Houd dus in de gedachte dat alles wat in dit boek beschreven wordt voor u toegankelijk en waarneembaar is!

Bij *alles* is de bedoeling dat u het ziet en dat u het doet!

De betekenis van de open lucht-waarnemingen voor het onderwijs in de natuurkunde is nog niet voldoende erkend. Zij helpen ons in het toenemend streven om ons onderwijs te doen aansluiten bij het leven: zij geven ons een natuurlijke aanleiding tot het stellen van duizenden vragen, en ze zorgen ervoor, dat hetgeen op school geleerd is later nog telkens en telkens ook buiten de schoolmuren wordt teruggevonden. Aldus wordt de alomtegenwoordigheid der natuurwetten als een steeds weer verrassende en indrukwekkende werkelijkheid ondervonden.

Daarnaast is ons boek bestemd voor ieder die houdt van de natuur; voor het jonge volk dat trekt door de wijde wereld en samenhokt bij het kampvuur; voor den schilder, die licht en kleuren in het landschap bewondert maar niet begrijpt; voor wie buiten leeft of van reizen houdt; en ook voor den stadsbewoner, omdat er in het rumoer en de drukte onzer donkere straten nog altijd een stuk natuur overblijft; zelfs voor den geschoolden natuurkundige hopen we dat het nog nieuws brengen zal, daar het behandelde gebied zo veelomvattend is en dikwijls buiten de gewone stroom der wetenschap ligt. Zo zal men begrijpen dat zeer eenvoudige naast veel moeilijker waarnemingen opgenomen zijn, gegroepeerd volgens de samenhang der verschijnselen in de natuur.

De poging die hier ondernomen wordt is waarschijnlijk de eerste in haar soort, en dus gebrekkig. Meer en meer ben ik overweldigd door de schoonheid en uitgebreidheid van de stof, en door het bewustzijn dat ik haar niet kan uiteenzetten op een wijze harer waardig. Gedurende twintig jaar heb ik stelselmatig natuurwaarnemingen uitgevoerd; een paar duizend verhandelingen uit alle mogelijke tijdschriften zijn hier verwerkt, al zijn daarvan alleen die aangehaald welke een samenvattend onverzicht geven, of die welke zeer bijzondere punten nader toelichten. Maar ik weet zeer goed hoe onvolledig deze verzameling nog is. Veel is mij onbekend gebleven van wat al bekend was, veel is ook voor den vakman nog een raadsel. Des te dankbaarder zal ik zijn aan allen die mij door eigen waarnemingen of literatuuropgaven willen helpen om fouten te verbeteren en leemten aan te vullen.

Het is mijn bedoeling, op dit boek spoedig een tweede en een derde te laten volgen, waarin de overige gedeelten der natuurkunde behandeld worden. Het handschrift van het geheel is klaar, en het zal slechts van de belangstelling van het publiek afhangen of de uitgave mogelijk is.

# De Natuurkunde van 't Vrije Veld
# I.
# Licht en kleur in het landschap

*Eerst en vooral beschouwen wij de hierop betrekking hebbende ervaringen in 't volle daglicht. We brengen den waarnemer in de open lucht, eer we hem in de beperking van de donkere kamer leiden.*

*Goethe, Farbenlehre, I, 1, 396*.

Voor alle lichtverschijnselen in de vrije natuur raadplege men het standaardwerk van Pernter-Exner, Meteoroligische Optik (Wien-Leipzig, 1922). Zie ook Jensen, Handbuch der Physik, XIX, 70. Een rijke bron van gegevens is de jaarlijkse publikatie: 'Onweders en Optische Verschijnselen' uitgegeven door het Kon. Ned. Meteorologisch Instituut te De Bilt.

# Licht en schaduw.

*O Zon! Wanneer je glijdt door 't loof der hoge linden,*
*Dan maak je lichte vlekken op de grond*
*Zo mooi, dat ik er niet op trappen durf.*

*E. Rostand.*

## 1. Zonnebeeldjes.

In de schaduw van een groep bomen zien we op de grond een aantal lichtvlekken, onregelmatig verspreid, sommige klein, sommige groot, maar alle mooi gelijkvormig elliptisch. Houd vóór een daarvan een potlood: de verbindingslijn potlood-schaduw geeft u aan, van waar de lichtstralen komen die het vlekje op de grond vormen: natuurlijk is dit zonlicht dat door een of andere opening van de boomkruin dringt; ons oog ziet hier en daar een verblindende lichtschijn tussen de bladeren.

Het verrassende is nu, dat al die beeldjes dezelfde vorm hebben; het is toch niet mogelijk dat die reten en spleten alle toevallig zo mooi gelijkvormig en rond zijn! Vang een beeldje op, op een stuk papier dat loodrecht op de stralen gehouden wordt: het is nu niet meer elliptisch, maar cirkelrond. Houd het papier hoger en hoger: het vlekje wordt voortdurend kleiner. Besluit: de lichtbundel die zulk een lichtvlekje vormt heeft de vorm van een kegel; de vlekjes zijn slechts elliptisch, omdat de grond die kegel schuin doorsnijdt.

Vermoeden: de oorsprong van het verschijnsel is daarin te zoeken, dat de zon niet puntvormig is. Ieder heel klein openingetje P (fig. 1) geeft een scherp ‘zonnebeeldje’ AB, een openingetje P' geeft een ietwat verplaatst scherp beeldje A'B' (stippellijnen!); een breder opening die P en P' beide omvat, geeft een iets wazig maar helderder zonnebeeldje A'B. Inderdaad zien we lichtvlekjes van allerlei lichtsterkte; van twee even grote is het helderste ook het minst scherpe.

Ter bevestiging: als er wolken over de zon trekken, ziet men die over elk der zonnebeeldjes schuiven, maar in tegengestelde

richting; bij gedeeltelijke zonsverduisteringen zien de zonnebeeldjes er alle sikkelvormig uit. Als er een grote zonnevlek is, kan men ze op de scherpste zonnebeeldjes zien. Maak zelf een heel duidelijk zonnebeeldje, door een blad dun karton te voorzien

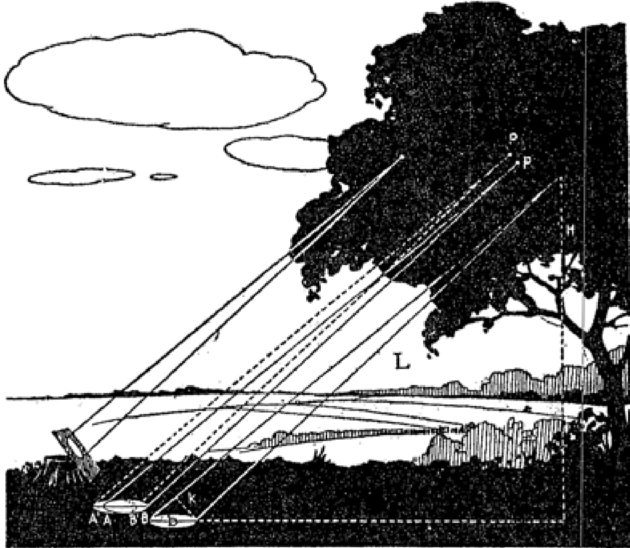



Fig. 1. Zonnestralen dringen door het dichte gebladerte.

van een kleine, zuiver ronde opening, en het zó op te stellen dat het zonnebeeldje op een mooi beschaduwd plekje terecht komt. Onderzoek op verschillende afstanden het zonnebeeldje, gevormd door een vierkante opening.




Fig. 2. We zien de zonneschijf onder een hoek van 1/108 radiaal.

De hoek waaronder we de zonneschijf zien moet dus ook de tophoek APB zijn van de kegel die een zonnebeeldje vormt. Dergelijke kleine hoekjes meten we dikwijls in ‘radialen’. We zeggen: ‘die hoek is 1/108 radiaal’ hetgeen betekent: de zon lijkt

ons zo groot als 1 cm op een afstand van 108 cm, of als 10 cm op een afstand 1080 cm (fig. 2). Evenzo moet dus de middellijn van een scherp zonnebeeldje het 108e gedeelte zijn van zijn afstand tot de opening; voor een wazig beeldje komt daar nog bij: de grootte van de opening in 't gebladerte. - Vang zwakke, scherpe zonnebeeldjes op een stuk papier op, houd dit goed loodrecht op de lichtstralen, meet de middellijn *k* van de lichtvlek, en bepaal met een touw de afstand L van het papier tot aan de opening in 't gebladerte. Is inderdaad *k* = 1/108 ongeveer?

Bij elliptische zonnebeeldjes zoals ze zich aftekenen op een waterpasvlak meten we de korte as *k* en de lange as *b*; zeverhouden zich zoals de hoogte H van de boom tot de afstand L. Hieruit volgt: H = *k*/*b* L = 108 *k*. *k*/*b*. Zo had een opvallend groot zonnebeeldje van een beuk de aslengten 53 cm en 33 cm; de hoogte van de opening in 't gebladerte boven de grond was dus 108.33.33 / 53 = = 2200 cm of 22 meter. - Merk op hoe de zonnebeeldjes 's ochtends en 's avonds langwerpiger zijn, 's middags meer rond.

Mooie zonnebeeldjes vindt men bij beuk, linde, esdoorn, niet bij populier, iep, noch plataan.

Let op de zonnebeeldjes van bomen aan de oever van ondiep water: ze tekenen zich zo leuk op de bodem af!

## 2. Schaduwen.

Kijk naar uw schaduw op de grond: de schaduw van de voeten is scherp, die van het hoofd onscherp. - De schaduw van de onderkant van een boomstam of paal is scherp, de schaduw van de hogere gedeelten wordt toenemend wazig.

Houd de uitgespreide hand vóór een stuk papier: de schaduw is scherp. Houd ze verder er van af: de *kernschaduw* van elke vinger wordt voortdurend smaller. De *halfschaduwen* worden echter breder en vloeien ineen.[1)]

Deze bijzonderheden zijn alweer een gevolg van de niet-puntvormigheid der zon, en komen overeen met wat we bij de zonnebeeldjes hebben waargenomen. Kijk naar de schaduw van een vlinder, van een vogel (- hoe weinig zijn we gewoon op zulke dingen te letten! -): die schaduw ziet er ongeveer uit als een ronde vlek, het is een ‘zonne-schaduwbeeld’.

1) Goethe, Farbenlehre, I, 1, 394-395.

Eigenaardig zag er de schaduw van een ijzeren vlechtwerk uit, dat als omheining diende en uit rechthoekige mazen bestond; men zag alleen de schaduw der vertikale draden, niet die der horizontale! Door een papier met een gaatje in de stralen te houden, bevindt men dat elk punt een ellipsvormig lichtvlekje op de grond geeft; de schaduw van een draad kan men zich ontstaan denken uit een aantal naast elkaar geplaatste dergelijke ellipsjes, ditmaal echter donker: zij wordt dus vrij scherp als de draad in de richting van de lange as loopt, wazig als hij in de richting der korte as loopt (fig. 3).

Houd een papier vlak achter het metaalgaas,




Fig. 3. Schaduw van ijzerdraden bij schuine zon.
wazige schaduw

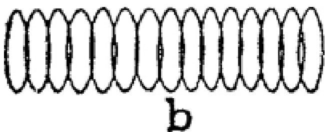



Fig. 3. Schaduw van ijzerdraden bij schuine zon.
scherpe schaduw

dan verder en verder, zodat het geleidelijk ontstaan der merkwaardige schaduwen te volgen is. Onderzoek gevallen waarin de zon in verschillend schuine richtingen invalt, schuin verlopende mazen, enz.

De schaduw heeft een belangrijke rol gespeeld in het volksgeloof. Het was heel erg als iemand gestraft werd door het verlies zijner schaduw; en wie een schaduw had waar het hoofd aan ontbrak, zou binnen het jaar sterven! Dergelijke verhalen, die bij alle volkeren en in alle tijden voorkomen, zijn ook voor ons belangwekkend: ze bewijzen hoe voorzichtig men met de bevestigingen van ongeschoolde waarnemers zijn moet, ook al zijn ze talrijk en éénstemmig.

## 3. Zonnebeeldjes en schaduwen bij zonsverduisteringen en bij zonsondergang.

Gedurende een zonsverduistering ziet men hoe de donkere maan voor de zonneschijf schuift, en weldra slechts een sikkel meer vrij laat. Op dat ogenblik is het de moeite waard op te merken hoe de zonnebeeldjes onder 't gebladerte er alle als gelijk gerichte sikkeltjes uitzien, klein of groot, helder of lichtzwak.

Daarmee komt weer de vorm der schaduwen overeen. De schaduwen onzer vingers bijvoorbeeld zijn eigenaardig klauwvormig gekromd. Elk klein donker voorwerpje zou nu een sikkelvormige schaduw vertonen; de schaduw van een

staafje ontstaat uit een aantal zulke sikkeltjes, en aan het uiteinde komt de kromming te voorschijn.

Een goed voorbeeld van zulk een alleenstaand donker voorwerpje is een luchtballon; men heeft inderdaad opgemerkt dat bij zonsverduisteringen zowel zijn schaduw als die van de mand sikkelvormig zijn.[1)] Ook een vliegtuig, mits op voldoende hoogte, geeft een gekromde schaduw[2)].

Zonsverduisteringen, zelfs gedeeltelijke, zijn zeldzaam voorkomende gebeurtenissen. Daarom is het aardig op te merken, dat dergelijke vervormingen van de schaduw ook te zien zijn als men aan 't strand de zon achter een vrije kim ziet ondergaan en de schaduw onderzoekt van munten en schijfjes van verschillende grootte, die men op een ruit heeft geplakt of aan een dun ijzerdraadje laat hangen. De vorm en de lichtverdeling veranderen naarmate van de afmeting der munten, en naarmate een groter gedeelte van de zonneschijf onder de kim daalt.

## 4. Verdubbelde schaduwen.

Als de bomen bladerloos zijn, ziet men wel eens plaatsen waar de schaduwen van twee evenwijdige takken elkaar bedekken. De ene is scherp en zwart, de tak is dicht bij ons; de andere is wazig en grijs: de tak is verder verwijderd. Het eigenaardige is nu, dat waar ze elkaar precies bedekken, een *lichte streep* binnen de smalste schaduw ontstaat, zodat deze schijnbaar verdubbeld is (fig. 4). Hoe komt dit?

Denk uw oog achtereenvolgens in A, in B, in C, in D, in E. Het zal dan telkens de zonneschijf zien, met de twee takken ervoor,

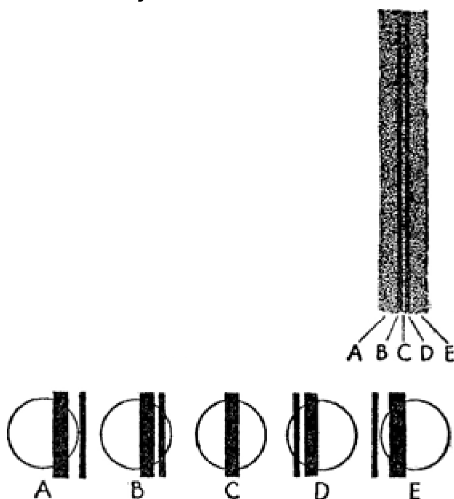


Fig. 4. Het ontstaan van verdubbelde schaduwen.

zoals in de 5 figuurtjes daaronder getekend is; om ze te onderscheiden hebben we aangenomen dat bv. de tak die het verst van ons af is, iets breder schijnt dan de andere. Nu is het duidelijk dat men in de standen B en D de zonneschijf op twee plaatsen bedekt zal zien, maar in stand C slechts op één plaats, omdat de takken zich dan

1) A. Wigand & E. Everling, Verh. d.d. phys. Ges. **14**, 748, 1912. - Deutsche Luftfahrer Ztg. **16**, 298, 1912.
2) Science, omstreeks 1930.

achter elkaar verschuilen. Zo begrijpt men vanzelf de oorsprong van de helderder middenstreep.

Blijkbaar zal het verschijnsel telkens ontstaan als de beide takken onder een hoek kleiner dan de zonneschijf gezien worden.

> *Ik ben nog eens vroeger langs het strand gegaan, evenals nu. Dat was op een avond, laat in Maart. De zon ging in het Westen in zee onder, de maan scheen helder in het Oosten. Lange tijd was het de zonsondergang die mijn schaduw bepaalde, zodat zij naar het Oosten viel*; **maar toen kwam er een poos dat ik in 't geheel geen schaduw had**, *totdat de helderheid van de maan sterker werd dan het avondrood, en mijn schaduw naar het Westen viel.*
>
> *Uit het IJslands van S. Nordal: Alfur van Windhael*.

Is dit juist waargenomen?

Schaduwen op een wateroppervlak: zie § 216, 217.

Schaduwen op mist: § 183.

# De terugkaatsing van het licht.

## 5. De wet der terugkaatsing.

Zoek een plaats waar u de maan weerspiegeld ziet in een zeer rustig wateroppervlak. Vergelijk de hoek van de maan boven de gezichteinder, en de hoek van het weerspiegelde beeld onder de gezichteinder: binnen

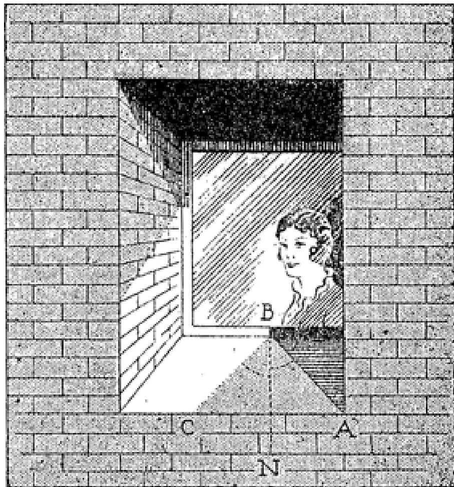



Fig. 5. Zonlicht, teruggekaatst door een inspringend raam.

de waarnemingsfouten zijn beide gelijk. - Als de maan niet hoog staat, kunt u bv. uw wandelstok met gestrekte arm vertikaal vóór u houden, zodat u de punt tegenover de maanschijf ziet, terwijl uw duim de gezichteinder bedekt; draai dan de wandelstok onderste boven om uw arm als as, en kijk of de punt nu aan het spiegelbeeld der maan raakt.

Dergelijke metingen, met de kijker aan scherpe sterrebeeldjes uitgevoerd, geven de nauwkeurigste toetsing der terugkaatsingswet.

Een inspringend raam wordt door een niet te hoge zon schuin beschenen (fig. 5). De richting van de invallende bundel ziet men aan de schaduw AB; het teruggekaatste licht valt als een heldere lichtvlek in de richting BC. Men ziet nu dat die twee richtingen symmetrisch zijn ten opzichte van de normaal BN, dus dat ∠ ABN = ∠ CBN. Dit is niet hetzelfde als de terugkaatsingswet, maar 't volgt eruit. Bewijs dit!

> Waarom weerspiegelen de ruiten der huizen alleen de op- of ondergaande zon?

## 6. Terugkaatsing tegen draden.

Een bundel telegraafdraden blinkt in de zon; loopt men evenwijdig aan de draden, dan verplaatst zich de lichtvlek met dezelfde snelheid als de waarnemer. 's Avonds zien we evenzo hoe het

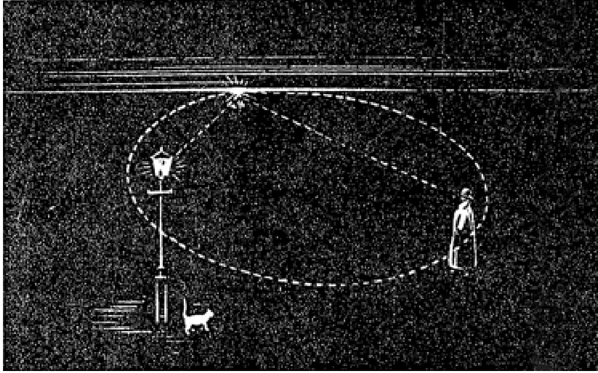


Fig. 6. Fantasieën van een nachtelijken wandelaar: de weerspiegeling van de straatlantaren tegen telegraafdraden.

licht van een straatlantaarn een verlichte lijn geeft op de trolleydraad van de tram. Waardoor wordt de juiste plaats van die reflexen bepaald? Construeer in gedachte het ellipsoide, dat als brandpunten ons oog en de lichtbron heeft en dat raakt aan de draad (fig. 5). Het raakpunt is dan de verlichte vlek; want het is een bekende eigenschap der ellipsoïde dat in elk punt de voerstralen gelijke hoeken maken met het raakvlak.

## 7. Verschillen tussen voorwerp en spiegelbeeld.

Menigeen denkt dat het spiegelbeeld van een landschap in een kalm watervlak er net zo uitziet als het landschap zelf, onderste boven gekeerd. Niets is minder waar! - Let maar 's avonds op, hoe sommige groepen straatlantarens weerspiegeld worden (fig. 7*a*). - Het spiegelbeeld van de dijk, die naar het water toe helt, schijnt verkort, en verdwijnt zelfs als we hoog genoeg boven het wateroppervlak staan (fig. 7*b*). - De top van een steen die in 't water ligt ziet u nooit teruggekaatst in het spiegelbeeld.

Al zulke effekten zijn vanzelfsprekend als men bedenkt dat het spiegelbeeld wel identiek is met het landschap zelf, maar er perspektivisch anders uitziet omdat het verschoven is. Wij zien het zó, alsof we 't landschap zelf bekeken van een punt onder de waterspiegel, spiegelbeeld van ons oog.

Er schijnt echter nog iets anders te

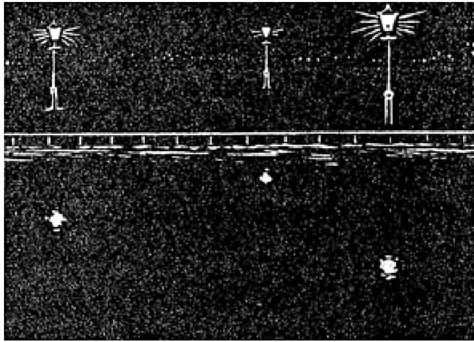


Fig. 7*a*.

zijn! De spiegelbeelden van bomen en struiken in kleine vijvers en in de plassen langs de weg vertonen soms een zuiverheid, een scherpte, een warmte van kleur, groter lijkend dan die van het gespiegelde voorwerp zelf. Wolken zien we nooit zo mooi als teruggekaatst in een spiegel. Een straat, weerspiegeld in een winkelruit met een donker gordijn als achtergrond, had een verrassende scherpte.[1)] De oorzaak van deze verschillen is meer psychologisch dan physisch. Men heeft ze gezocht in het feit, dat het weerspiegelde

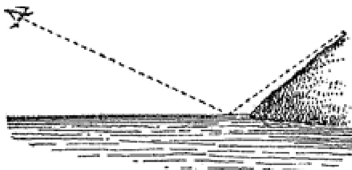


Fig. 7*b*. Een voorwerp kan er anders uitzien dan zijn spiegelbeeld.

tafereel altijd aangevoeld wordt als een schilderij dat in één vlak ligt (*physisch* liggen de spiegelbeelden natuurlijk net zo goed in allerlei vlakken als het voorwerp zelf). Anderen zeggen, dat de omlijsting ons onzeker maakt omtrent de positie van het ding in de ruimte, hetgeen sterkere relief-indrukken doet ontstaan.[2)] Belangrijker nog schijnt mij, dat het oog beschermd blijft tegen overtollige verblinding door het grote, heldere veld van de hemel om het waargenomen tafereel: een effekt dus van dezelfde

1) H.R. Mill, Geogr. Journ. **56**, 526, 1926. - Vaughan Cornish, ibid. blz. 518.
2) J.O.S.A. **10**, 141, 1925.

aard als het kijken door een buis. De geringere helderheid van het spiegelbeeld is ook op zichzelf al gunstig voor het bekijken van de hemel en de wolken, die anders iets te fel zijn voor ons oog.

*Ik ging eens langs de oevers van de Aisne, ten prooi aan een onuitsprekelijk lijden, dat geen bepaalde reden had en juist daardoor ongeneselijk scheen. Het beeld van een brug, teruggekaatst in het water, heeft mij opeens het zelfvertrouwen teruggegeven en het kennen van de vreugde. En toch was dit slechts een weerspiegeling; maar geloof nooit wie u zeggen zou dat het slechts een weerspiegeling was.*

*G. Duhamel, La Possession du Monde, blz. 206*.

## 8. Speelse weerspiegelingen. (Plaat III).

Een huizenrij werpt een donkere schaduwstrook over de straat; maar temidden daarvan zijn er hier en daar onverwachte lichtvlekken



Fig. 8. Ook in de donkerste arbeidersbuurt valt hier en daar een plekje zonneschijn.

(fig. 8). Hoe komt het licht daar? - Houd uw hand vóór de lichtvlek, en besluit uit de plaats van de schaduw uit welke richting de stralen invallen: het blijkt dat ze teruggekaatst zijn door de ramen van huizen aan de overzij.

Op dergelijke wijze ziet men lichtvlekken glinsteren op het oppervlak van een kanaal dat zelf in de schaduw ligt. De huizen aan de overkant werpen het licht terug.

Aan de oever van 't water staat een rij huizen waarvan de gevels geheel in de schaduw zijn; toch lopen er lichtspelingen over: een lichtschijn met daarin regelmatige, min of meer evenwijdige strepen die voortbewegen. 't Zijn terugkaatsingen van de watergolven (fig. 9). Het gedeelte AB van de golving werkt als holle spiegel en geeft een brandlijntje in L, een gedeelte BC van de golf is veel minder

gekromd en verenigt de stralen op veel groter afstand. Zo is er voor elke afstand

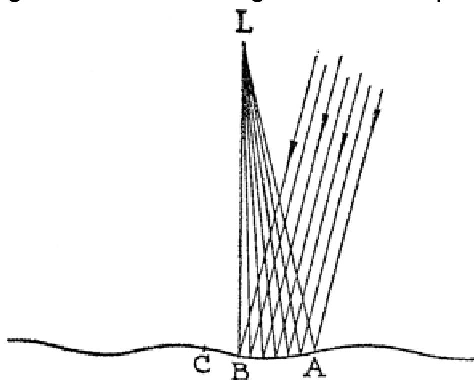



Fig. 9. Vorming van lichte lijnen door weerspiegeling op zacht golvend water.

van de muur altijd een deel van het wateroppervlak dat een scherpe lichtlijn geeft; de andere delen geven dan de algemene lichtschijn.

Dergelijke lichtspelingen ziet men ook langs kaden en tegen 't gewelf van overkapte bruggen. We hebben hier eigenlijk een model van het fonkelen der sterren (vgl. § 40).

## 9. Schieten op een spiegelbeeld.

Bij Salzburg is er een meer, de Königsee, door hoge bergen omsloten en daardoor zeer rustig. Men houdt er schietwedstrijden, waarbij de schutter op het spiegelbeeld van de schijf in 't water mikt, en de kogel tegen het oppervlak 'terugkaatst' en het doel treft. De trefzekerheid schijnt tenminste even groot als bij een rechtstreeks schot. - Wie doet dit hier eens na?

Het eigenaardige is, dat de kogel niet aan de oppervlakte zelf teruggekaatst wordt, maar *in* het water dringt. Volgens een hydrodynamische stelling zijn de vloeistofstromingen dan zó, dat de bewegende kogel door het wateroppervlak 'aangetrokken' wordt; hij nadert er meer en meer toe, en treedt tenslotte onder dezelfde hoek uit als waaronder hij in het water gedrongen was. Door schermen op te hangen die onder water dompelen, heeft men de baan van de kogel kunnen volgen.[1)]

## 10. De heliotroop van Gauss.[2)]

Kaats zonlicht terug met een spiegeltje; vlakbij heeft de lichtvlek de vorm van de spiegel zelf, verder afwordt ze minder scherp,

1) Ramsauer, Ann. d. Phys. **84**, 730, 1927.
2) 2) A. Gruber: Heliograph (Verzameling 'Spiel und Arbeit', No. 29; Ravensburg).

nog verder wordt ze rond, en op grote afstand is het een echt zonnebeeldje geworden. Als u dan een deel van het spiegeltje afschermt, blijft de lichtvlek rond maar wordt lichtzwakker. Meer dan 50 m ver zult u die lichtvlek wel niet kunnen volgen; een waarnemer echter die zich daar bevindt ziet het spiegeltje nog fel schitteren in de zon.

Zet het spiegeltje in een statief of klem het vast tussen stenen, ergens op een plek met vrij uitzicht, en wel zo dat de teruggekaatste zonnestraal goed waterpas loopt. Ga nu achteruit, zo ver als u het licht nog zien kunt. Het kost enige moeite in de bundel te blijven; gelukkig wordt zijn doorsnede breder naarmate men verder komt: dat merkt u als u zich dwars op de bundel verplaatst, en bepaalt binnen welke grenzen u hem nog ziet; op 100 m afstand is hij al 1 m breed. Verder moet bedacht worden dat de zon zich aan het uitspansel verplaatst; het is daarom best de proef rond middagtijd uit te voeren, dan blijft de teruggekaatste bundel althans in het horizontale vlak zonder dat veel bijregelen nodig is.

Het is verbazend, zo ver als zulk een lichtpuntje nog zichtbaar blijft! Gauss heeft op die wijze bij graadmetingen zeer scherpe lichtbronnen gemaakt, die met de kijkers der meetinstrumenten tot op afstanden van 100 km waargenomen konden worden. Zulk een heliotroop heeft bijzondere viseerinrichtingen om de lichtstraal precies te kunnen richten naar een willekeurig punt. Door afschermen en weer doorlaten van het licht kunt u Morsetekens seinen.

### 11. Weerspiegeling in een tuinbol.

De bolle spiegels waarvan men ons op school vertelt zijn altijd klein en weinig gekromd; zij komen overeen met het stukje AB van de tuinbol dat vlak naar ons toe gekeerd is, en waarin we ons eigen spiegelbeeld zien.

Maar de tuinbol als geheel is veel interessanter! Het merkwaardige van het ding is, dat we hier *de gehele oppervlakte van de hemelsfeer* (juister: hemel + aarde) samengedrongen zien in een beperkt kringetje: de tuinbol werkt als een optisch toestel met ideaal grote openingshoek! Natuurlijk kan dit slechts doordat de beelden vervormd worden; ze worden samengedrukt in de richting van de straal, en wel des te meer naarmate ze dichter bij de omtrek van de tuinbol liggen (fig. 10). Onderstel eenvoudig-heidshalve dat zowel het voorwerp als de waarnemer vrij ver van de tuinbol verwijderd zijn (ver t.o.v. de straal R); dan zal een

voorwerp op hoekafstand $\alpha$ van de lijn CO afgebeeld worden op een afstand $\gamma = R. \sin \alpha/2$ van het midden van de bol. Men ziet dat $\gamma \rightarrow R$ voor $\alpha \rightarrow 180^{\circ}$, en dat dus inderdaad de hele ruimte op de bol wordt afgebeeld. Verloren wordt alleen het kleine stukje dat precies achter de

Fig. 10. Hoe een kleine tuinbol het heelal weerspiegelt.

tuinbol ligt, en dat des te kleiner wordt naarmate we verder van de bol staan.

Helmholtz heeft eens gezegd dat een landschap, door een tuinbol vervormd, weer normaal zou bevonden worden als de meetstaaf waarmee men het tafereel uitmeet volgens dezelfde wet vervormd was. Deze uitspraak is nauw verwant aan de beginselen der relativiteitstheorie.

De tuinbol kan voor alleraardigste waarnemingen gebruikt worden op 't gebied der meteorologische optica, juist omdat hij zulk een goed overzicht geeft van een geheel stuk van de hemel.[1] Als men zich op een afstand van een paar meter plaatst, en wel zó dat men het spiegelbeeld van de zon met zijn hoofd bedekt, ziet men met bijzondere duidelijkheid (vgl. nog verder):

*a.* kringen, kransen, iriserende wolken, de ring van Bishop, de schemeringskleuren;

*b.* de bundels van Haidinger en de polarisatie van het hemellicht. Door de verkleining van het beeld worden de langzaam verlopende tinten omgezet in veel sterkere gradiënten, zodat de verschillen van helderheid en kleur meer in het oog vallen. In de glimmende oppervlakte van mijn fietsbel heb ik meer dan eens heel ijle wolkjes gevonden, die ik bij rechtstreeks waarnemen niet opgemerkt had.

## 12. Oneffenheden van een wateroppervlak.

Een effen plas in een duinpan; windstil weer. Hier en daar steekt een grashalm of een bies uit het water op, en nu is het leuk om te zien hoe elk halmpje omringd is door een schitteringetje van zonlicht, daar waar het uit het water komt: het kleine water-

1) A. Hoffmann, das Wetter, **34**, 133, 1917.

bergje, dat capillair om zo'n halm zit, wordt aldus van verre zichtbaar. Als een deel van de waterplas een donkere duinhelling weerspiegelt, een ander de heldere lucht, ziet men nabij de grenslijn hoe al de kleine waterbergjes oplichten of donker afsteken, al naar de richting waarin men kijkt.

Op dezelfde wijze kunnen we waterwerveltjes opsporen, overal waar een rivier noemenswaarde stroming vertoont. In ieder werveltje is de druk iets kleiner en het oppervlak lichtelijk uitgehold; orde van grootte der uitholling: 4 cm middellijn en een paar mm diep. Nabij een grens tussen licht en donker ziet men zelfs de zwakste werveltjes met grote duidelijkheid. Het is een heel gevoelige ‘slierenmethode’, toegepast in de vrije natuur.

Het heeft geregend. In de

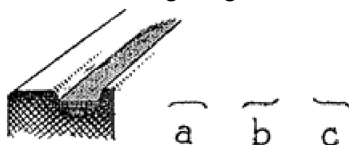


Fig. 11. Regen in een tramspoor vormt een gekromde spiegel.

tramsporen staat water, en nu zien we een dwarse horizontale lijn daarin teruggekaatst, bv. de ophangdraad van de trolleykabel. Kijken we in het vertikale vlak van de rail, dan zien we het teruggekaatste beeld symmetrisch vervormd (fig. 11*a*): een duidelijk bewijs dat het wateroppervlak gekromd staat en een capillaire meniskus vormt. Stellen we ons links van de rail, dan vervormt zich het beeld zoals in fig. 11*b*; rechts, zoals in fig. 11*c*. Overweeg eens waarom het spiegelbeeld juist deze vorm aanneemt.

De beelden, gegeven door een gebogen wateroppervlak, kunt u prachtig bestuderen van op een stoomboot, omdat u altijd in dezelfde stand en richting naar de golven kijkt die met hem meelopen. Bemerk vooral hoe de spiegelbeelden al vervormd worden door de eerste golving die de boeg teweegbrengt.[1] De beelden zijn sterk samengedrukt; ze zijn rechtopstaand of omgekeerd, naarmate u naar een bol of naar een hol gedeelte van het oppervlak kijkt.

## 13. Vensterglas en spiegelglas.

Aan de weerspiegeling in de ruiten van de huizen kan men onmiddellijk zien of ze uit spiegelglas of uit vensterglas gemaakt zijn: in het eerste geval zijn de beelden vrij zuiver; in het andere geval zo onregelmatig, dat de hobbels in de ruit rechtstreeks te voorschijn komen.

Het is opvallend hoe verschillend de rijke buurten en de be-

1) F.A. Forel, le Léman, II (Lausanne, 1895).

scheidener straten van een stad er ook van dit standpunt uitzien! Midden in een deftige rij met spiegelglas onderscheiden we één enkel huis met vensterglas. Aan twee spiegelglasruiten die naast elkaar zitten, merken we dat ze niet nauwkeurig in 't zelfde vlak liggen, want de spiegelbeelden van een daklijn zijn iets verschoven ten opzichte van elkaar. Elders zien we hoe een goede spiegelruit een ongelukkig hoekje heeft, of hoe een andere in haar geheel zwak gebogen is.

## 14. Onregelmatige terugkaatsing op een zacht gerimpeld oppervlak.[1)]

Voor mij zijn de lange lichtstrepen der weerspiegelde lantarens onafscheidelijk verbonden met de rustige stemming van de avond. Ik zie de maan die zich spiegelt in zee, en er een brede stroom van licht over laat vloeien. Of ik denk aan de huizen en torentjes van het oude Brugge, weerspiegeld in de stille reien: iedere lichte vlek, iedere kleur uitgerekt tot een vertikaal lijntje, en al die lijntjes, soms langer, soms korter, wemelend van lichtwisselingen en onvatbare glansen ....

Als we de maan of een lantaren 's avonds zien weerspiegelen in zacht bewogen water, dicht bij ons, bemerken we hoe eigenlijk ieder golfje een afzonderlijk lichtbeeld geeft. *Het geheel* van alle verlichte golfjes is *gemiddeld* een langwerpige vlek, met haar langste as in het vertikale vlak oog-lichtbron. *Dit uitrekken van een lichtpunt tot een zuil*, die naar ons oog gericht is, terwijl de golfjes toch geheel onregelmatig zijn, en in alle richtingen even veelvuldig voorkomen, is het fundamentele verschijnsel dat we verklaren moeten. Aan het uiteinde dat naar ons toe gekeerd is, zien we goed hoe de lichtzuil soms langer, soms korter wordt, naar gelang van de golving van het water. Aan het uiteinde dat het verst van ons af is, vloeien daarentegen de lichtvlekjes meer tot een gemiddelde ineen.

Eigenlijk zou men dus de gemiddelde verdeling der lichtsterkte over zulk een zuil als kansvraagstuk moeten opvatten en bereke-

1) Zie vooral: J. Piccard, Arch. sc. phys. et nat. **21**, 481, 1889. - Verder: J. Spooner, Correspondance Astronomique, 1 Mei 1822, blz. 331. - G. Galle, Ann. d. Phys. **49**, 255, 1840. - C. Schoute, H. en D. **7**, 1, 1909. - A. Wigand en E. Everling, Verh. d.d. phys. Ges. 15, 237 en 1117, 1913; Phys. Zs. **14**, 1156, 1913; Met. Zs. **31**, 150, 1914. - E.O. Hulburt, J.O.S.A. **24**, 35, 1934. - W. Shoulejkin, Nat. **114**, 498, 1924. - K. Stuchtey, Ann. d. Phys. **59**, 33, 1919. - Deze verschillende schrijvers kenden geen van allen hun voorgangers!

nen. Dit is nooit behoorlijk gebeurd. We maken het ons dus maar gemakkelijk door aan te nemen, dat de hellingen der golfjes niet groter worden dan een bepaalde hoek $\alpha$, en vragen alleen naar de *grenzen* der lichtzuil die zich aldus vormt. Of, anders uitgedrukt: als er op elke plaats een groot aantal kleine golfjes zijn, alle hellend over een hoek $\alpha$, maar naar al de verschillende windstreken, wat is dan de meetkundige plaats van de golfjes die zullen oplichten? Ook aldus gesteld wordt het vraagstuk nog ingewikkeld genoeg!

1. *Het eenvoudigste geval: h* = *h*'; waarnemer en lichtbron bevinden

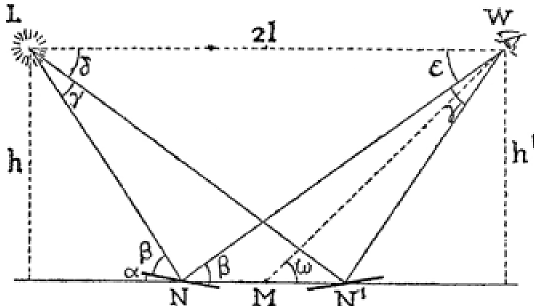


Fig 12. Berekening van de lange as ener weerspiegelde lichtzuil.

zich even hoog boven het water. (fig. 12).

Een horizontaal vlakje werpt licht in het oog van den waarnemer W, wanneer het zich precies halverwege bevindt, bij M, de plaats der regelmatige terugkaatsing. Een vlakje dat onder een hoek $\alpha$ helt moet een eind uit het midden geschoven worden,

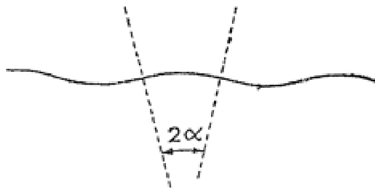


Fig. 13.

wil het voor den waarnemer weer licht geven. Hoe ver?

Bij verschuiving in het vertikale vlak door oog en lichtbron is die vraag gemakkelijk te te antwoorden. Noem N de gunstige stand als het vlakje in de éne zin helt, N' als het in de andere zin helt. Om symmetrieredenen is MN = MN'. Let nu op de hoeken:

$\beta + \alpha = \gamma + \delta$

$\beta - \alpha = \square = \delta$

Dus is $\gamma = \alpha + \beta - (\beta - \alpha) = 2\alpha$.

Dit is een belangrijk resultaat! *De hoek waaronder we de langste as van de lichtzuil zien, is tevens de hoek tussen de twee grootste hellingen van de golfjes* (fig. 13).

Laten wij nu ons golfoppervlakje verschuiven in het vlak door M, loodrecht op de verbindingslijn oog-lichtbron, en noemen we P, P' de punten waar de gunstige terugkaatsing bereikt is (fig. 14). Klaarblijkelijk is MP = MP' = h tg $\alpha$. De lichtzuil is dus breed: 2h tg $\alpha$, en we zien die korte as onder

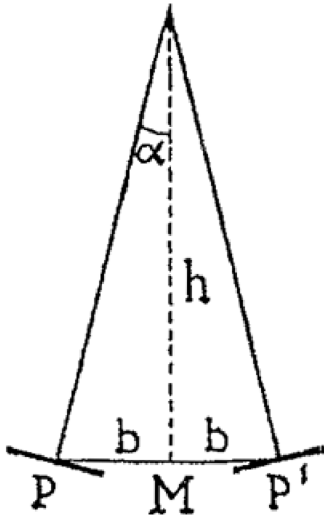


Fig. 14. Berekening van de korte as ener weerspiegelde lichtzuil.

een hoek

$$\frac{PP'}{WM} = \frac{2h \operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{l^2 + h^2}}$$

.

De verhouding der schijnbare assen van de lichtzuil is dus:

$$\frac{h \operatorname{tg} \alpha}{a \sqrt{h^2 + l^2}}$$

, of ongeveer

$$\frac{h}{\sqrt{h^2 + l^2}} = \boxed{\sin \omega}$$

wanneer de lichtzuil niet te groot is. Kijken we dus van een heuvel op het water neer, dan is de lichtzuil weinig langwerpig ($\omega$ groot, sin $\omega$ bijna[1]. *Hoe schuiner we over 't water kijken, hoe langwerpiger de zuil.* Bij rakelingse blikrichting is ze oneindig lang en smal.

We moeten dus altijd onderscheiden tussen 'de primaire ovaal', een kromme die men op het rimpelende water getekend kan denken, de grens der lichtzuil aangevend; en tussen 'de sekundaire ovaal', die uit de vorige ontstaat door projektie op het vlak loodrecht op onze blikrichting. Van de primaire ovaal kan men wel de assen eenvoudig berekenen, maar de hele figuur is een kromme van de 6e graad, symmetrisch t.o.v.M. De sekundaire ovaal wordt een weinig asymmetrisch, de grootste breedte ligt eigenlijk iets meer naar ons toe dan het punt M waar we de dwarse as berekenden. Vooral kijkend onder een kleine hoek met het oppervlak is die asymmetrie merkbaar.

1)

2. *Het algemene geval:* $h \neq h'$ (fig. 15).

Door dergelijke redeneringen als daareven toont men de twee fundamentele eigenschappen aan:

$$\begin{array}{r} u + v' = 2a \\ u' + v = 2a \\ \hline u + v + u' + v' = \boxed{\gamma + \gamma' = 4a} \end{array}$$

De verdere berekening bewijst dat de lichtzuil ongeveer elliptisch van omtrek blijft, maar de resultaten zijn ingewikkeld en onoverzichtelijk. Praktisch heeft het hoogteverschil tussen *h* en *h*' alleen invloed op de afmetingen der lichtzuil, niet op haar verhoudingen; bij benadering is natuurlijk

$$\frac{\gamma}{\gamma'} = \frac{h'}{h}, \text{ dus}$$

, dus

$$\boxed{\gamma = 4\alpha \cdot \frac{h'}{h + h'}}$$

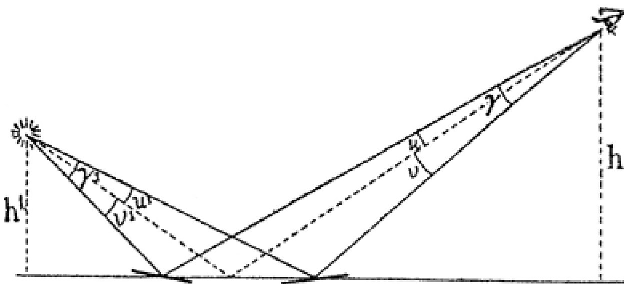



Fig. 15. Waarneming van een lichtzuil wanneer wij ons op een andere hoogte dan de lichtbron bevinden.

3. *Bijzonder geval: h*' = ∞. Dit geldt voor de zon, de maan en zeer hoge lantarens. De formules worden nu: $\gamma = 4\alpha$; PP' = 2*h* tg 2$\alpha$ (zoals men bewijst). Wij zien dus de assen der ovaal onder hoeken van ongeveer 4$\alpha$ en 4$\alpha$ sin $\omega$. De verhouding van de schijnbare lengte en breedte der lichtzuil is dus sin $\omega$, precies dezelfde als bij het geval 1, maar alle afmetingen zijn tweemaal groter.

De volgende redenering geeft zonder berekening een overzicht van de lichtverdeling bij deze weerspiegelingen (fig. 16). Denk u de spiegelende oppervlakjes op heel kleine schaal, vlak bij het centrum van een grote bol; de normaal op het ongestoorde wateroppervlak eindigt in N, de normalen op de hellende golfvlakjes eindigen dus in een cirkeltje op hoekafstand $\alpha$ van N; de oneindig ver verwijderde lichtbron wordt voorgesteld door een punt L op de bol. Om nu te vinden hoe bijvoorbeeld het oppervlakje met normaal OS de stralen weerspiegelt, is het voldoende de grote cirkel LS te trekken, en hem te verlengen tot S', zo dat SS' = SL. Men ziet aldus onmiddellijk, dat de door alle golfjes teruggekaatste stralen een kegel vormen met zeer langwerpige doorsnede, des te langwerpiger naarmate we schuiner op het wateroppervlak kijken. Het is ook gemakkelijk in te zien, dat de kegel der blikrichtingen, van het oog van den waarnemer naar de grenzen der lichtzuil, geheel en al dezelfde vorm heeft.

Vergelijk de lichtzuil van de maan met die van een lantaren die u ongeveer in dezelfde richting weerspiegeld ziet. In het algemeen worden de lichtzuilen groter naarmate

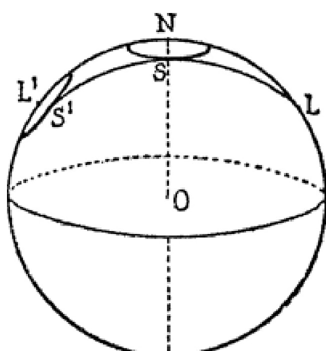



Fig. 16. Het ontstaan van lichtzuilen, toegelicht door een konstruktie op de bol.

de lichtbron verder verwijderd is. Voorwerpen die zich vlak bij het water bevinden geven een bijna puntvormig, niet uitgerekt beeld.

Vergelijk de lichtzuilen die u onder verschillende hoeken met het wateroppervlak waarneemt.

Bepaal de hoek $2\alpha$ uit de lengte der lichtzuilen (in hoekmaat) bij allerlei windsterkten.

Bemerk hoe de lichtzuilen prachtig lang, regelmatig, mooi vertikaal worden als het regent: de golfjes zijn wel klein, maar hebben sterke hellingen.

Het is ook de moeite waard, de vormen der lichtweerspiegeling na te gaan op elk

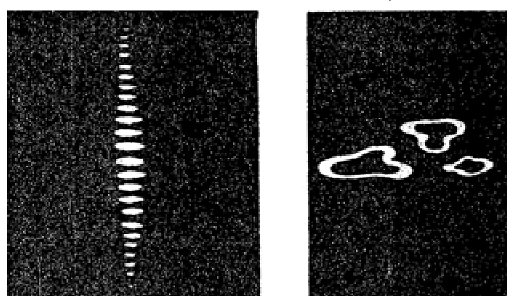


Fig. 17. a. Lichtzuil op zacht golvend water. b. Weerspiegeling van lichtreclames in de Amstel.

der afzonderlijke golfjes. Ieder golfje geeft een in horizontale richting uitgerekt lichtvlekje, des te meer tot een lijntje naderend naarmate de zon lager staat; en al die lijntjes samen vormen de vertikale zuil (fig. 17).

Eigenaardig is het verschijnen van gesloten kronkels (fig. 17), die men ziet als de lichtbron vrij hoog staat en een groot oppervlak heeft (b.v. lichtreclames met neonbuizen).

Er is nog een perspektivische bijzonderheid aan deze lichtzuilen verbonden. Elke lichtzuil ligt altijd in het vertikale vlak door mijn oog en de lichtbron (uitzonderingen, zie § 15). Wanneer ik een tekening of een schilderij maak, projekteer ik alles op een vlak dat vertikaal voor mij staat, en dus moeten alle lichtzuilen vertikaal

lopen, ook al zijn ze buiten het midden van het tafereel. - Op een schilderij van Claudes in de Uffizi zit de zon nabij de zijkant van het doek, en heeft de schilder een lichtzuil weergegeven die van de zon schuin naar het midden van het voorplan toeloopt. Dit echter is fout![1]

Richt een fototoestel op de zee, verlicht door de zon, en bekijk op het matglas de verdeling van het licht dat door de golven weerspiegeld wordt; daaruit zijn de hellingen der golven en eventuele voorkeursrichtingen af te leiden, de gehele toestand van het wateroppervlak is met één blik te overzien en kan fotografisch vastgelegd worden.[2]

## 15. Terugkaatsing in een gerimpeld wateroppervlak met voorkeursrichting.

Dikwijls vertonen de lichtzuilen een duidelijke asymmetrie: zodra men schuin ten opzichte van de richting van het kanaal

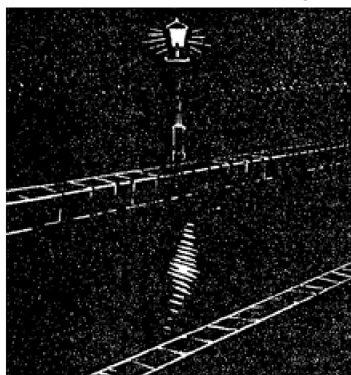


Fig. 18. Een verwonderlijk gezicht: de lichtzuil ligt niet in het vertikale vlak door oog en lichtbron!

kijkt, liggen ze *niet meer in het vertikale vlak door de lichtbron en het oog van den waarnemer*, hun richting nadert dan meer tot de richting van het kanaal zelf (fig. 18). Kijkt men schuin over het kanaal naar de andere kant, dan wijken ze weer af van de vertikaal, ditmaal echter naar de andere zijde hellend: dus weer naderend tot de kanaalrichting.

Toch is onze theorie niet fout, want als het regent bij windstil weder zijn de zuilen zuiver vertikaal, in welke richting men ook kijkt. De oorzaak der afwijkingen is de wind, die de golfjes bij voorkeur dwars op de kanaalrichting rimpelt, zodat we niet meer van het beeld der ideaal onregelmatige golvingen mogen uitgaan. Ten bewijze dienen de volgende waarnemingen:

*a.* in een *zeer* brede rivier is de afwijking veel minder stelselmatig, de golfjes hebben daar geen duidelijke voorkeursrichting loodrecht op de oevers;

1) Ruskin, Modern Painters, *III*, 511.
2) W. Shoulejkin, t.a.p.

*b.* is het water met een ijslaagje bedekt, dan schijnt dit veel kleine hobbeltjes te hebben en geeft een duidelijke lichtzuil: maar die is vertikaal;
*c.* op een geasfalteerde straatweg, die vochtig is na een regenbui, zijn dezelfde afwijkingen waar te nemen als op een kanaal bij wind, zowel aan de terugkaatsing van straatlantarens als aan die van

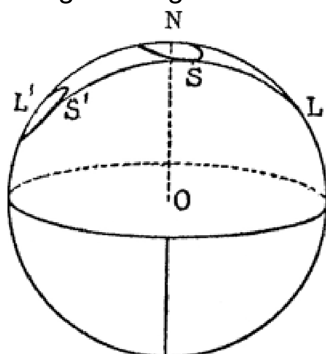



Fig. 19. Het ontstaan van scheve lichtzuilen als er een voorkeursrichting van de golfjes is.

auto- en fietslampen. En inderdaad: in de asfaltlaag komen er hobbels door 't verkeer (hun ontstaan is op zichzelf een belangwekkend verschijnsel!). Als we het oppervlak van de weg bekijken, kunnen we de hobbels rechtstreeks zien, en opmerken dat het echte golven zijn, met hun kammen loodrecht op de richting van de weg.

De uitvoerige behandeling van dit verschijnsel is nog niet gegeven. Maar in hoofdtrekken kunnen we 't wel overzien met behulp van onze projektie op de bol, althans voor het geval ener oneindig ver verwijderde lichtbron (fig. 19). Wanneer de normalen over de vlakjes verdeeld zijn zoals voorgesteld door de kromme lijn die N omgeeft, zullen de gespiegelde stralen gericht zijn naar de onderscheidene punten van de kromme lijn om L'; de as der zuil ligt dus niet meer in het vlak LNL', maar wijkt schuin af.

## 16. Weerspiegeling in zeer grote gerimpelde wateroppervlakken.[1)]

Bij weerspiegeling in de zacht golvende zee treedt een verschijnsel op dat we noemen zullen: *de verschuiving der spiegelbeelden naar de gezichteinder* (fig. 20). De grens AB tussen wolk en blauwe lucht ligt in de weerspiegeling A'B' heel veel dichter bij de horizon dan aan de hemel. De eerste 25$^{\circ}$ of 35$^{\circ}$ van de hemel boven de gezichteinder komen eigenlijk nauwelijks te voorschijn in de weerspiegeling! Natuurlijk zijn alle beelden onregelmatig vervormd, maar het effekt is toch zeer duidelijk, en zo opvallend, dat het de gehele lichtverdeling over de zee beheerst. Zo komt het ook dat men bomen aan de kust, duinen enz. nooit weerspiegeld ziet: ze zijn niet hoog genoeg. Ook schepen zijn ternauwernood ooit in de onregelmatige terugkaatsing terug te vinden, want de

1) E.O. Hulburt, J.O.S.A. **24**, 35, 1934.

donkere vlek die ze moesten geven wordt door dit effekt tot vlak bij het schip teruggedrongen.

De weerspiegeling van de zon in de golven is een verblindend

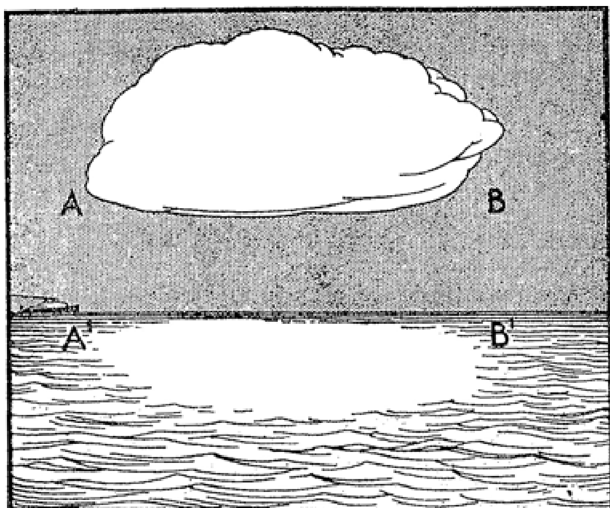
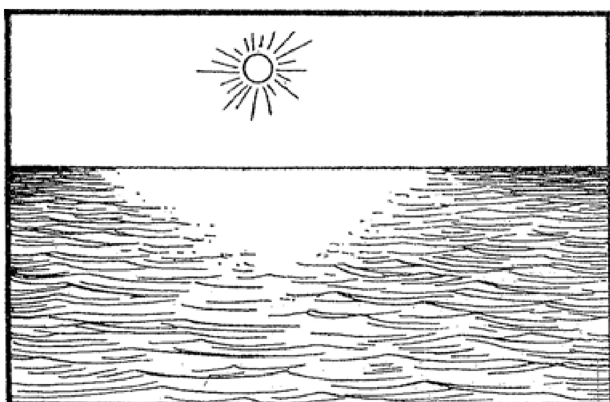


Fig. 20. Weerspiegeling op zee: het spiegelbeeld van de wolk is naar de kim toe ‘verschoven’.


Fig. 21. Zonlicht op de zee.

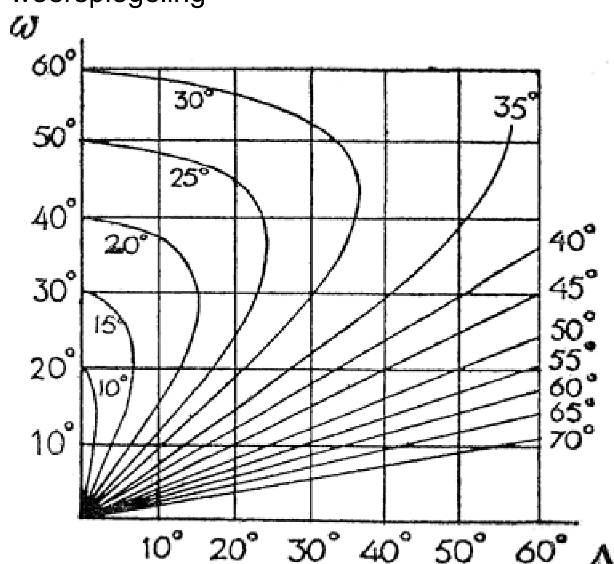
heldere vlek, die bij laagstaande zon min of meer driehoekvormig is, en dus ook de verschuiving naar de gezichteinder vertoont (fig. 21).

De verklaring van deze verschijnselen is gemakkelijk te geven: op grote afstand van ons zien wij van de golven alleen de naar ons toe gekeerde hellingen;



Fig. 22. Verklaring van de verschoven spiegelbeelden. De lichtstraal valt steil in maar wordt vrij vlak weerspiegeld.

het is dus alsof wij alle voorwerpen van de hemel weerspiegeld zagen in een naar ons toe hellende spiegel (fig. 22). Dit geeft vanzelf de verschuiving der spiegelbeelden naar de gezichteinder. Uit de verdwijning der eerste 30° in de weerspiegeling




Bij elke waargenomen waarde van ω en Δ past een punt; beoordeel de ligging daarvan t.o.v. de kurven, die ieder met een zekere waarde van *α* overeenkomen.
(Naar E.O. Hulburt, J.O.S.A., **24**, 35, 1934.)

volgt, dat de golven gemiddeld hellingen van ongeveer 15° in elke richting vertonen (bij niet uitgesproken rustige noch erg stormachtige zee).

Waarom kwam dit effekt niet te voorschijn bij onze theorie in § 14? Omdat we niet het geval hebben beschouwd, waarin $\omega < 2\alpha$, dus waarin we zeer schuin langs het wateroppervlak kijken; dit geval, waarin onze berekeningen niet meer opgaan, komt telkens voor als het wateroppervlak maar zeer uitgestrekt is, en inzonderheid bij de zee. Hoe kalmer het wateroppervlak, hoe schuiner men hiervoor kijken moet.

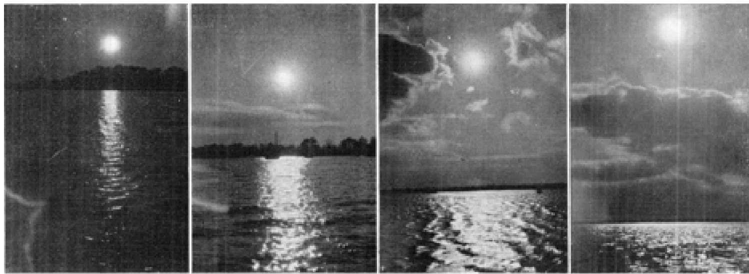
Of aan deze voorwaarde voldaan is, bemerkt men onmiddellijk bij het gadeslaan van de zonbeschenen zee: de lichtzuil bereikt dan de gezichteinder. We kunnen nu de hellingen der golfjes niet meer uit de lengte der lichtzuil meten, maar gebruiken een ander middel: worden de golfjes steiler, dan bedekt zich



Fig. 23. Kan ik aan het spiegelbeeld der opgaande zon in een uiterst rustige zee de kromming der Aarde waarnemen?

een toenemend breder stuk van de gezichteinder met fonkelend licht. Meet deze hoek Δ, de breedte dus van de zuil aan de horizon; meet ook de zonshoogte $\omega$, en bepaal nu hieruit de helling $\alpha$ der golven met behulp van de grafische voorstelling blz. 23; ofwel met de formule van Spooner, vereenvoudigd voor zonshoogten beneden $15^o$: $\alpha = \Delta / 2\omega$. (Vgl. plaat I)

De opgaande en ondergaande zon vertonen in zeer kalme zee een bijna lijnvormig spiegelbeeld, dat met de vurige zonneschijf zelf ineenvloeit en een soort Ω vormt (fig. 23). Bij zeer uitzonderlijk effen zee heeft men wel eens het elliptische spiegelbeeld gezien toen de zon al wel $1^o$ boven de gezichteinder was; meestal krijgt men echter al heel gauw de overgang tot de reeds beschreven driehoekige lichtvlek. In dergelijke gevallen begint de kromming van het aardoppervlak ook al een rol te spelen; als er helemaal geen golfjes waren overgebleven, zou men kunnen zeggen dat men hier de rondheid van de Aarde rechtstreeks voor zijn ogen ziet! Echter is in het gunstigste tot nu toe onderzochte geval de



PLAAT I.
De zon wordt door de zee weerspiegeld en vormt lichtzuilen, des te breder naarmate ze hoger staat en de zee sterker golft. Bemerk dat de verre kust geen spiegelbeeld heeft.
Naar E.O. Hulburt, J.O.S.A., **24**, 35, 1934.

waargenomen verschuiving naar de gezichteinder nog altijd wel dubbel zo groot als de kromming der Aarde kan doen verwachten.[1)]

## 17. Zichtbaarheid van zeer zwakke golvingen.

Heel zwakke golvingen ziet men veel beter als men loodrecht op de golfkammen kijkt dan wanneer men evenwijdig eraan waarneemt. Voor een kanaal moet men dus in 't algemeen evenwijdig aan de kanaalrichting kijken om te zien hoe de wind het water rimpelt. Vandaar ook, dat de prachtige dwarsgolven achter een schip alleen van op een brug waargenomen worden, maar van op de oever praktisch onzichtbaar zijn! De reden is precies dezelfde als die waarom het beeld van een lantaren tot een lichtzuil wordt uitgerekt. Kijkt men loodrecht op de golfjes, dan ziet men om zo te zeggen de lange as der lichtzuil; kijkt men evenwijdig er aan, dan ontstaat de korte as. Het komt altijd daarop neer, dat een golfje meer ‘uitwerkt’ in een vlak loodrecht op zijn kamrichting dan in die richting zelf.

## 18. Lichtzuilen in een vuil wateroppervlak.

Bij een geheel effen, spiegelglad wateroppervlak, zien we toch dikwijls lichtzuilen om de spiegelbeelden der straatlantarens 's avonds. Deze lichtpluimen vertonen niet de wemelende wisselingen der lichtzuilen op de golfjes, ze staan volkomen rustig en onbewegelijk. Ze ontstaan overal waar het wateroppervlak niet geheel schoon is: blijkbaar vormen de stofjes op het water even zovele heel kleine hobbeltjes in het oppervlak, die optisch net als golfjes werken. Men zou dan verwachten, deze lichtzuilen des te slanker te zien worden naarmate men schuiner op het oppervlak kijkt; - dit komt inderdaad uit.

Bij min of meer loodrechte inval ziet men de lichtzuilen bijna niet; bij rakelingse inval zijn ze zeer opvallend, en vormen een gevoelig criterium voor de schoonheid van een wateroppervlak. Het intensiteitsverschil is zo sprekend, dat hier iets bijzonders in 't spel moet zijn. Die stofjes zijn zo klein, dat men al van *verstrooien* van het licht moet spreken; en nu zullen we zien dat de verstrooiing door zulke stofjes verreweg het sterkst is in de buurt van de richting van de invallende lichtbundel. Vandaar stellig dat de lichtverstrooiing en de hele lichtzuil sterker en sterker worden, naarmate men schuiner kijkt.

1) A. Ricco, V. Cerulli, A. Venturi, in Mem. Spett. Ital. **17**, 203, 1888; **18**, 23, 45 en 57, 1889. - Vgl. ook Spooner, t.a.p. blz. 337.

## 19. Lichtzuilen op sneeuw.

Soms is de sneeuw bedekt met een laag mooie vlakke plaatjes en sterretjes, alle min of meer in horizontale stand. Zoekt men bij lage zon haar spiegelbeeld in de sneeuwlaag, dan ziet men een

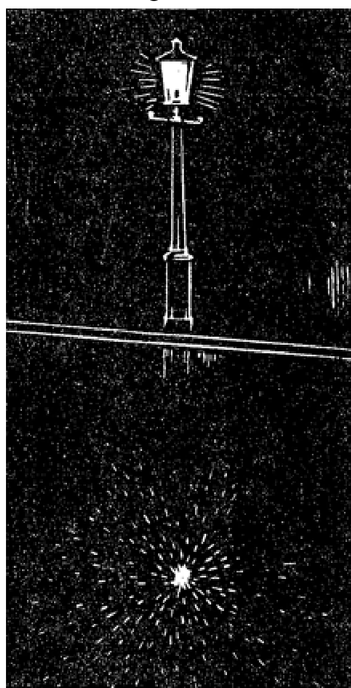


Fig. 24. Regendruppels tekenen vurige vonkjes om het spiegelbeeld van een straatlantaren.

mooie lichtzuil, die toe te schrijven is aan kleine onregelmatige afwijkingen van de sneeuwplaatjes ten opzichte van het horizontale vlak. De zon moet laag staan, omdat de lichtzuil zich dan samentrekt in de dwarsrichting en duidelijker te voorschijn komt.

De vorming van die lichtzuilen is nog treffender in de avond, als de straatlantarens branden en als ieder licht zich spiegelt in de verse sneeuw.

## 20. Lichtzuilen op straatwegen.

Dezelfde lichtzuilen die we op golvend water zien, komen ook te voorschijn op onze straatwegen, het mooist wanneer het geregend heeft en alles glimt van de nattigheid; men ziet ze prachtig op ons moderne asfalt, maar ook op de ouderwetse straatkeien, zelfs op grintwegen. Ook zonder regen spiegelen onze wegen meestal zo goed, dat er wel altijd lichtzuilen ontstaan, *mits men schuin genoeg kijkt* (verder van de normaal en meer naar de gezichteinder toe). Vgl. § 15.

## 21. Lichtreflexen bij regen.

Bekijk het spiegelbeeld van een straatlantaren in een waterplas, 's avonds, bij regen. Het is omringd door een aantal lichtvonkjes, die overal ontstaan waar er net een regendruppel valt, en die er

alle uitzien als *lichtlijntjes die van het spiegelbeeld uitstralen*. (fig. 24). Forel merkte een dergelijk verschijnsel op, als hij door een donker glas naar het zonsbeeld keek, weerspiegeld in rustig water waar hier en daar luchtbelletjes uit opstegen.[1)]

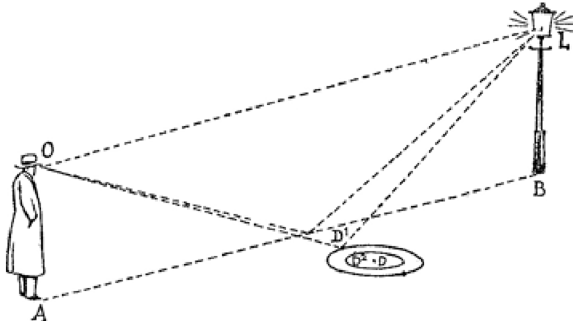


Fig. 25. Hoe de vonkjes om het spiegelbeeld ontstaan.

De verklaring is eenvoudig. Elke druppel maakt een stelsel concentrische golfjes, en de reflexen tegen de zijkanten daarvan moeten altijd liggen op de verbindingslijn van het centrum der golven met het spiegelbeeld der lichtbron (fig. 25). Dit is bv.

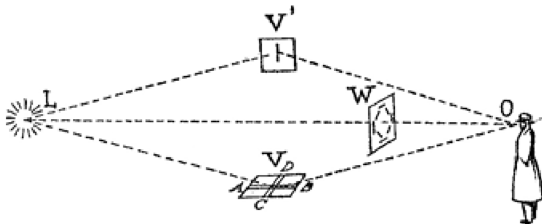


Fig. 26. Hoe de lichtkringen in boomkruinen ontstaan.

ineens in te zien als lichtbron L en oog O even hoog boven het wateroppervlak zijn, en het druppeltje D even ver van beide neervalt: de punten $D_1$ en $D_2$ liggen dan op de lijn MD; als een golfje zich kringvormig om D uitbreidt, beschrijft de lichtreflex een stuk van de lijn DM, en dit zo snel, dat we een lichtlijntje menen waar te nemen. Even klaarblijkelijk is de stelling,

1) Le Léman, II, 507.

wanneer de regendruppel in het vlak OML valt, hetzij vóór, hetzij achter M.
Het verschijnsel is na te bootsen als men een lamp gespiegeld ziet in een glazen plaat, en dan over die plaat een voorwerp verschuift dat concentrisch geribbeld is (deksel van suikerpot, op de draaibank geschuurd plaatje enz.).
Beproef het bewijs algemeen te leveren.

## 22. Lichtkringen in boomkruinen.[1)]

Als een bladerloze boom vlak voor een lantaren staat, ziet men 's avonds hoe de takken en twijgen het licht hier en daar weerspiegelen; die lichtglansen zijn eigenlijk kortere of langere lichtlijntjes; en al die lijntjes zijn in concentrische cirkels om de

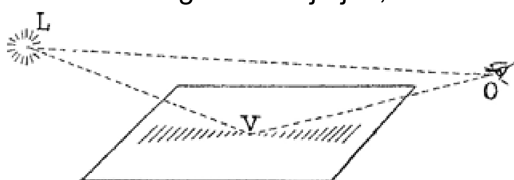
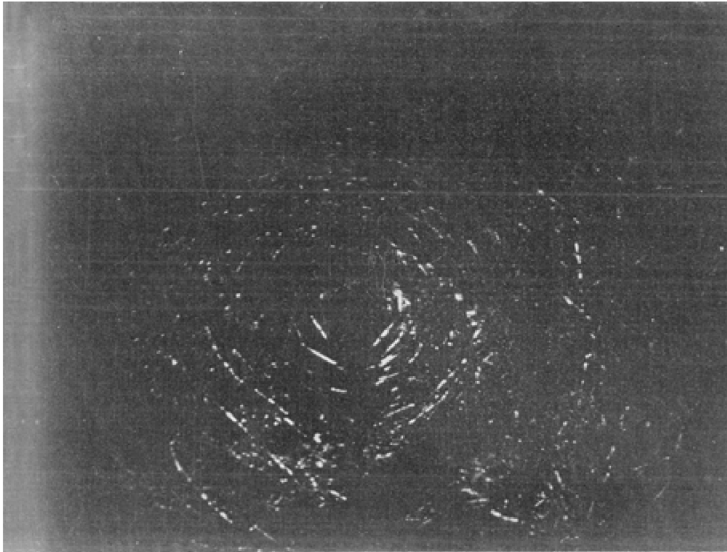


Fig. 27. Vergelijk de lichtkringen in boomkruinen met de lichtzuilen op golvend water.

lichtbron gerangschikt! (Plaat II) Men ziet het verschijnsel het best, als men zelf in de schaduw van de boomstam staat en als de lantaren dicht bij de boom hangt. Maar ook met zonlicht is het waar te nemen, bijvoorbeeld als de takken vochtig zijn van de regen, of als zich het fijne lijnenspel van glimmende berketwijgjes tegen een donkere achtergrond aftekent; de zon zelf moet liefst door een muur of dak afgedekt zijn, zodat ze ons niet verblinden kan.
Verklaring (fig. 26). - Beschouw een vlakje V dat het licht van de lantaren naar ons oog weerspiegelt. Alle takjes in dit vlak zullen wij zien glimmen. Maar de takjes zoals AB zien wij sterk perspektivisch verkort, de takjes CD in hun volle lengte. Waar takjes van allerlei richtingen even veelvuldig voorkomen, zullen wij dus in hoofdzaak lichtlijnen zien loodrecht op het vlak OLV. Een dergelijke stelling geldt ook voor andere vlakjes zoals V', die wij boven, rechts of links van de lichtbron zien:

1) Fokker, Physica, **2**, 238, 1922.





PLAAT II*a*. Kijkt men 's nachts dwars door een boomkruin naar een brandende lantaren, dan ziet men de glimmende takken als kringen om de lichtbron.
PLAAT II*b*. Dezelfde boom en de lantaren bij dag. De glimmende kringen komen één voor één met bepaalde takken overeen.
Naar opnamen van Dr. Ir. A.J. Staring, Wageningen.

wij krijgen aldus de indruk van concentrische cirkels. - Men ziet gemakkelijk dat de voorkeur in de richting des te sterker uitgesproken wordt naarmate onze blik een kleinere hoek met de lijn OL vormt, en dat die voorkeur nog iets sterker zal zijn voor een oneindig verre lichtbron zoals de zon, dan voor een lantaren die dichtbij ons staat.

> Vergelijk dit geval met de lichtzuilen op golvend water (fig. 27)! We moeten ons nu als 't ware denken, dat boomtakjes niet overal in de ruimte voorkomen, doch slechts in één vlak (= het wateroppervlak). De enige lijntjes die in dit vlak liggen en toch bij benadering deel uitmaken van concentrische cirkels om OL, zijn ieder loodrecht op het vlak OVL gericht, maar vormen samen een zuil in dit vlak. Dit is geheel analoog aan de watergolfjes.

Een dergelijk verschijnsel kan men nog waarnemen als men de laagstaande zon in een korenveld ziet schijnen. Of bij mistig weer, als de spinnewebben bedauwd zijn met kleine druppeltjes, en men door zulk een spinneweb naar een brandende straatlantaren kijkt. Of aan de krasjes op de ruiten van een treinraampje (vgl. 159). In al deze gevallen glimmen in hoofdzaak de lijntjes loodrecht op het invalsvlak van het licht, en krijgt men de indruk van concentrische cirkels om de lichtbron.

# De breking van het licht.

## 23. Breking van het licht bij overgang van lucht in water.

De vaarboom waarmee de schipper zijn schuit voortduwt lijkt gebroken daar waar hij door het wateroppervlak gaat; dit beeld ontstaat, doordat de lichtstralen geknikt worden als ze

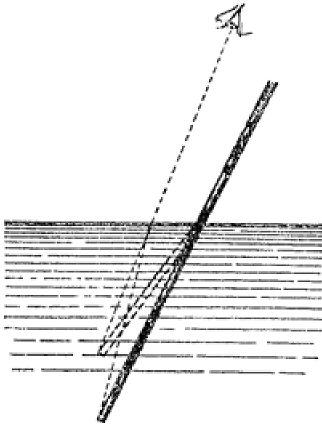


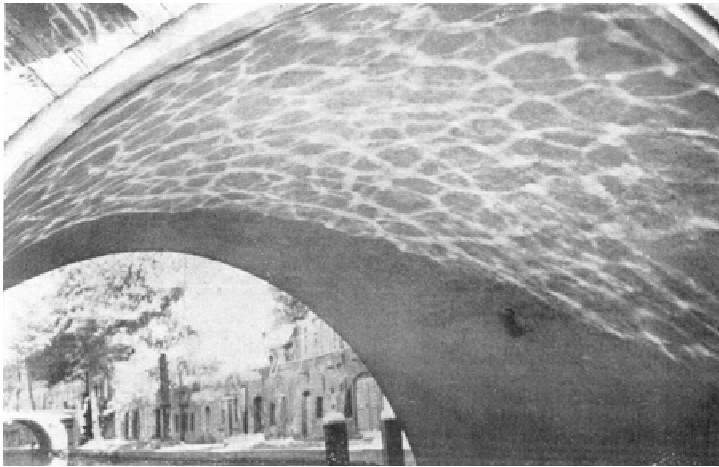
Fig. 28. De breking der lichtstralen veroorzaakt een schijnbare knik van de vaarboom.

van lucht naar water overgaan (of omgekeerd). Merk echter op dat ‘de gebroken stok’ daarom nog geen beeld geeft van de gebroken lichtstraal! Deze laatste is juist in omgekeerde zin geknikt; het verband blijkt uit fig. 28.

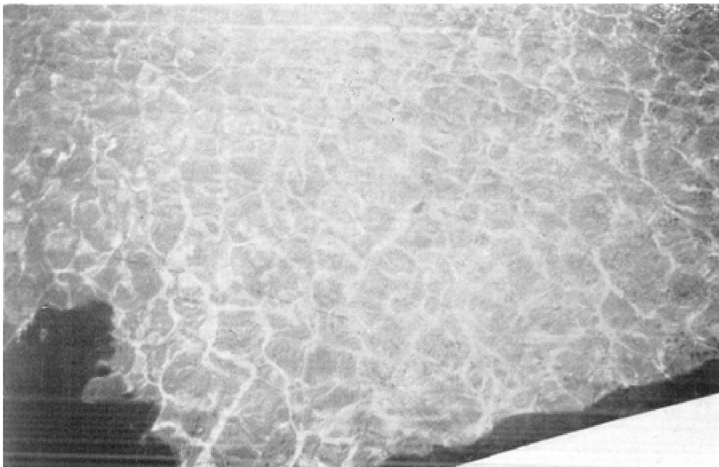
Schat de afstand van een voorwerp dat zich onder water bevindt en beproef het snel te grijpen: meestal komt u bedrogen uit, want door de breking van de lichtstralen schijnt het voorwerp opgeheven (vgl. fig. 29). Het ligt dieper dan u dacht. Toch is het verschijnsel niet zo eenvoudig, dat de breking van het licht het voorwerp als 't ware vervangt door een hoger gelegen beeld: als u voorbij een heldere sloot wandelt of fietst, ziet u de waterplanten in de diepte een eigenaardige plaatsverandering vertonen: het verplaatste beeld verschuift telkens en wordt des te meer opgelicht naarmate u schuiner kijkt. (plaat IVb)[1)]

De schaduw van de drijvende bladeren van de waterlelie op de bodem van een heldere plas ziet er merkwaardig ingesneden uit alsof het die was van een palmblad.[2)] Verklaring: aan de rand is het blad een weinig opgekruld, daar staat het water capillair tegen op, en de lichtstralen breken in het aldus gevormde pris-

1) F.A. Forel, Le Léman (Lausanne 1895), II, 456.
2) Kerner von Marilaun, Pflanzenleben.



PLAAT III.
Het gerimpelde oppervlak van de gracht weerkaatst het zonlicht in een grillig netwerk van lijnen tegen 't gewelf van een oude brug.



Zonlicht, gebroken door zacht golvend en ondiep water, wordt op de bodem tot lichtlijnen verenigd.

matje: ze worden in onregelmatige vegen binnen het schaduwgebied geworpen.

Op de bodem van een ondiepe vijver of dicht bij de oever van een riviertje werpt de zon vrolijke lichtslierten door het

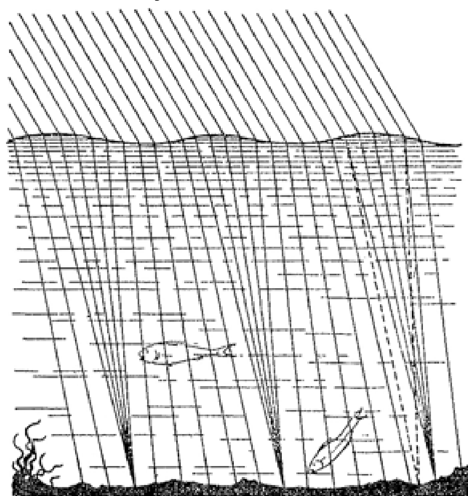


Fig. 30. Zonnestralen dringen in het water, en worden door de breking der golfjes tot lichtlijnen verzameld. De (gestippelde) blauwe stralen worden sterker gebroken

heldere water: de welvingen der golfjes werken als lenzen, en verenigen de lichtstralen in brandlijnen, die zachtjes met de golven mee voortlopen (fig. 29).[1] We hebben al een dergelijk lichtverschijnsel in teruggekaatst licht leren kennen (§ 8), en vinden nu de tegenhanger bij de breking. - Wanneer de stralen schuin invallen, zijn de lichtlijnen met kleuren omzoomd: blauwachtig naar de zon toe, roodachtig van de zon af. Dit komt, omdat de blauwe stralen sterker gebroken worden dan de rode: het verschijnsel der kleurschifting (= dispersie). (Vgl. plaat IIIb).

Werp een wit keitje in diep, helder water en stel u op enige afstand om het te bekijken; het schijnt aan de bovenzij blauw en aan de onderzij rood gekleurd.[2] Ook dit is een gevolg van de kleurschifting.

## 24. Breking door hobbelige ruiten.

Als u in oude treinwagens door de raampjes kijkt, ziet u dikwijls dat er bepaalde stroken van de ruiten zijn die de beelden geheel vervormen. Schijnt de zon door zulk een ruit op een blad

1) F.A. Forel, Le Léman, II, 454. Deze verschijnselen zijn nog mooier waar te nemen met behulp van een waterkijker (§ 209).
2) L. Boltzmann, Populäre Schriften, 59.

papier, dan ziet men bij dezelfde plaatsen heldere of donkere vegen zich op het papier aftekenen; houd het papier wat verder achteruit: zulk een veeg trekt zich samen tot een tamelijk scherpe lichtlijn.

Blijkbaar is de ruit geen planparallele plaat maar vertoont ze dunnere en dikkere delen; deze werken als onregelmatige lenzen: ze spreiden de lichtstralen uit of verenigen ze, geven grillige brandlijnen (vgl. § 23).

## 25. Dubbele beelden, teruggekaatst door spiegelglas.

Kijk naar een verre lantaarn of naar het beeld van de maan, teruggekaatst in de spiegelruiten van een huis langs de weg.

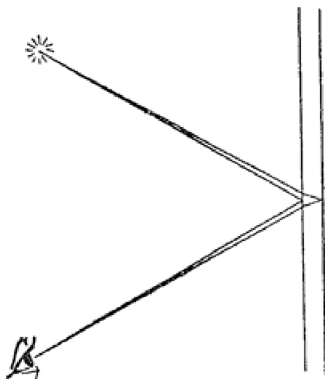


Fig. 31. Een zuivere planparallele spiegelruit geeft dubbele beelden, maar deze liggen uiterst dicht bij elkaar.

U ziet *twee* beelden, het ene verplaatst zich op onregelmatige wijze ten opzichte van het andere naarmate de weerspiegeling op het ene of op het andere gedeelte van de ruit gebeurt[1]. - Nog niet zo lang geleden heeft een 'wijsgeer' betoogd,[2] dat men hier een geval had van 'werkingen zonder oorzaak'!! Laten wij natuurkundigen eens kijken of we hier geen oorzaak kunnen ontdekken.

We merken op dat de mooie gepolijste platen van zwart glas, die bij deftige firma's naast de deur prijken, geen dubbele beelden geven. Het is dus duidelijk dat bij een spiegelruit het éne beeld teruggekaatst is door het voorvlak, en dat het tweede gevormd is door stralen die door het glas zijn gegaan, tegen het achtervlak teruggekaatst, en dan weer door het glas ons oog hebben bereikt. Bij zwart glas wordt die tweede soort stralen opgeslorpt.

De breking doet een der stralen een weinig afwijken van zijn richting (fig. 31). Kan dit de oorzaak der dubbele beelden zijn? - Neen. Want *a*) dan zouden ze niet op verschillende delen van dezelfde ruit de ene maal veel dichter tot elkaar naderen dan

1) Ztschr. f.d. phys. chem. Unterricht, **4**, 86, 1891; **37**, 90, 1924.
2) E. Barthel, Arch. f. system. Philos. **19**, 355, 1913.

de andere maal; *b*) ze zouden niet veel verder uiteen liggen dan de dikte van 't glas, wat nauwelijks waar te nemen zou zijn; *c*) de verplaatsing zou nul zijn voor zeer kleine en zeer grote invalshoeken (met een maximum nabij 50°, zoals men berekenen kan), terwijl wij ook bij loodrechte inval dubbelbeelden waarnemen; *d*) voor een oneindig verre lichtbron, zoals de maan, zou de afstand der dubbelbeelden altijd nul zijn.

Besluit: *een planparallele glazen plaat kan zulke dubbelbeelden niet geven. Deze zullen echter wel ontstaan indien de ruit hier en daar een weinig wigvormig is*, doordat de oppervlakken zwak golven. Eer we echter vrede hebben met die verklaring, moeten we berekenen hoe groot de hoek tussen vóóren achtervlak moet zijn, om de waargenomen afstand der dubbelbeelden te verklaren; want het is onwaarschijnlijk dat bij goed spiegelglas de afwijkingen van de evenwijdigheid groot zouden zijn.

Denk eerst de twee vlakken evenwijdig, en volg één straal die zich splitst: de twee teruggekaatste stralen zijn evenwijdig gebleven en alleen een weinig

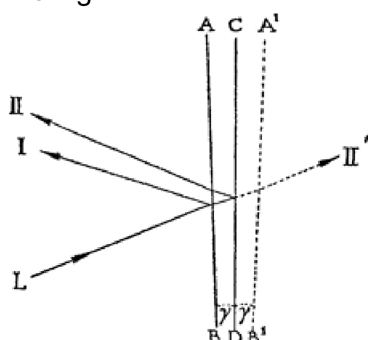



Fig. 32. Het ontstaan der dubbele spiegelbeelden bij een ruit die niet overal even dik is.

verschoven. Laat nu het voorvlak AB hellen onder een hoekje $\gamma$ (fig. 32). De straal I draait dan over een hoek $2\gamma$. Om de weg van de straal II te volgen, denken wij ons CD als een spiegel, die van AB een spiegelbeeld in A'B' geeft, en van de straal II een spiegelbeeld II'. Nu zien we dat de lichtstraal LII' door een prismatje ABB'A' gegaan is, met een kleine brekende hoek $2\gamma$; men leert in de geometrische optica dat zulk een prismatje een hoekafwijking $(n - 1)\ 2\gamma$ aan de lichtstraal geeft, wanneer de invalshoek niet te groot is. De totale hoek tussen I en II is dus $2\gamma + (n - 1)\ 2\gamma = = 2n\gamma$; voor glas is $n = 1{,}52$, dus wordt de hoek ongeveer $3\gamma$. In fig. 33 ziet men welke gevolgen dit heeft als een waarnemer O naar de lichtbron L kijkt, die zeer verwijderd is: de twee stralen I en II, die praktisch evenwijdig van de verre lichtbron aankomen, verenigen zich in het oog van den waarnemer onder een hoek $3\gamma$[1).]

Besluit: *schat de hoekafstand tussen de spiegelbeelden, de hoek van de twee glasoppervlakken is daar het derde gedeelte van.*

De schatting van die hoek kan b.v. gebeuren door de afstand

1) Voor een ander bewijs, zie § 26.

*a* der spiegelbeelden op het glas te bepalen, te delen door de

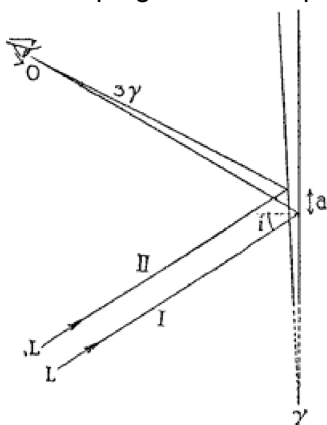



Fig. 33. Hoe men uit de hoekafstand *γ* der twee spiegelbeelden de wigvormigheid ener spiegelruit nauwkeurig bepalen kan.

afstand R van oog tot ruit, en te vermenigvuldigen met cos *i*. Men vindt bij gewoon spiegelglas hoeken van een paar duizendste radiaal[1)] = enkele boogminuten. Op 10 cm afstand verloopt de dikte van de ruit dus bv. 0,2 mm. Dat is zo weinig, dat we 't niet zouden merken zonder nauwkeurige diktemetingen aan de spiegelruit uit te voeren; toen men ging meten vond men die schatting inderdaad bevestigd.

Is het niet prachtig dat we dergelijke uiterst kleine fouten van het glas zonder enig hulpmiddel, al wandelend, nauwkeurig kunnen bepalen? En daarenboven is ons nu gebleken dat onze verklaring van de dubbele beelden wel juist is. Als we voor een verschijnsel in de natuur geen oorzaak weten aan te wijzen, dan ligt dat aan onze onwetendheid!

Algemener en nauwkeuriger formule: de hoekafstand der twee beelden is

$$2m\gamma\frac{R'}{R + R'}$$

, waarin R' = afstand lichtbron - glas, R = afstand oog - glas, en 2*m* de volgende waarden heeft:

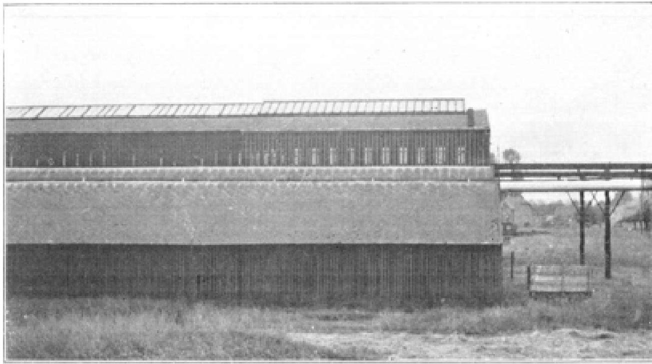
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| invalshoek = *i* | $0^o$ | $20^o$ | $40^o$ | $60^o$ | $80^o$ | $90^o$ |
| 2*m* = | 3,0 | 3,4 | 3,6 | 5,0 | 13,3 | ∞ |

Aan gewoon vensterglas kan men de meervoudige beelden niet goed onderzoeken, omdat ze op de vreselijkste wijze door het hobbelig oppervlak vervormd worden: de methode is te gevoelig.

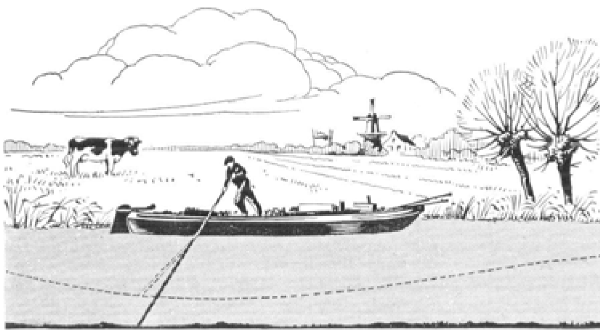
## 26. Meervoudige beelden, gegeven door spiegelglas in doorvallend licht.[2)]

1) Voor het begrip radiaal, vgl. § 1.
2) H.M. Reese, J.O.S.A. **2**1, 282, 1931.

Kijk 's avonds in schuine richting door een *goede* ruit van tram, auto of autobus naar een lantaren in de verte of naar de maan. U ziet verscheidene beelden op ongeveer gelijke afstanden van elkaar, het eerste sterk, de volgende steeds zwakker; hoe



PLAAT IV.
Zwevingen tussen de planken aan de vóór- en aan de achterzijde ener loods.



De man die de schuit voortduwt ziet de vaarboom ‘gebroken’ en de bodem van het riviertje ‘opgeheven’.

schuiner u door de ruit kijkt, hoe groter hun afstanden worden en hoe minder ze in lichtsterkte ten opzichte van elkaar schelen.

Het is duidelijk dat dergelijke verschijnselen ontstaan door herhaalde terugkaatsingen tegen voor- en achterwand van de

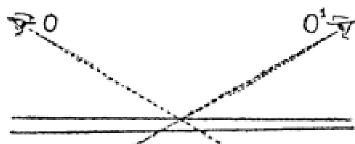



Fig. 34. Het helderste der meervoudige spiegelbeelden ligt altijd aan dezelfde zijde van de waarnemer.

ruit. Het verschijnsel gelijkt eigenlijk zeer op dat der dubbel teruggekaatste beelden; we hebben weer dezelfde redenen om zeker te zijn dat de voor- en de achterkant niet evenwijdig zijn, en zelfs nog een reden meer: *bij een planparallele ruit zou het helderste beeld altijd naar de kant moeten liggen die het verst van ons oog verwijderd is*, onverschillig of we door de ruit kijken in de richting O of O'; *de waarneming leert daarentegen dat het helderste beeld altijd aan dezelfde zijde ligt* (altijd links of altijd rechts), zolang men door één bepaald punt van de ruit kijkt (fig. 34). Maar in dezelfde ruit kan men gedeelten vinden waar het helderste beeld het meest rechtse is, en andere waar het helderste beeld aan de linkerzijde ligt: in het eerste geval hebben we een wigvormig gebied getroffen waarvan de dikste zijde naar ons oog toe gekeerd is; in het tweede geval ligt de dikste zijde van ons oog af.

Laten wij de hoekafstand der beelden berekenen volgens een ietwat andere

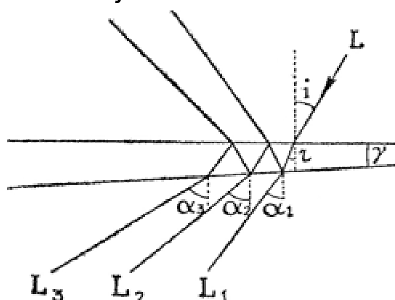



Fig. 35. Meervoudige beelden in doorvallend licht.

methode dan in § 25. Men ziet fig. 35) dat de stralen $L_1$, $L_2$, $L_3$, op het achtervlak invallen onder hoeken $r + \gamma$, $r + 3\gamma$, $r + 5\gamma$, .... Nu is sin $\alpha_1$ = $n$ sin ($r + \gamma$), of, daar $\gamma$ een kleine hoek is,

evenzo is $\sin \alpha_2 = n \sin r + 3\gamma n \cos r$;

dus $\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2 = 2\gamma n \cos r$.

Aangezien de aangroeiing van $\alpha$ gering is, mogen we de differentiaalformule $d(\sin \alpha) = \cos \alpha . d\alpha$ toepassen, zodat $a_1 - a_2$ =

$$\frac{2n \cos r}{\cos i} \gamma$$

Een dergelijke redenering zouden we met behulp van fig. 32 ook voor de herhaaldelijk teruggekaatste beelden kunnen houden. De scheiding der opeenvolgende beelden is precies even

groot bij de waarneming in teruggekaatst als in doorvallend licht; de faktor vóór $\gamma$ is inderdaad dezelfde die wij in § 25 door $2m$ hebben voorgesteld, en waarvan de waarde daar aangegeven is.

## 27. Waterdruppels als lenzen.

De regendruppels tegen de ruiten van een treincoupé geven heel kleine beeldjes, net als een sterk lensje; maar natuurlijk zijn die beeldjes vervormd, aangezien de druppel allesbehalve zuiver lensvormig is. Ze staan onderste boven; en terwijl het landschap buiten in *tegengestelde* richting van de trein schijnt voorbij te schuiven, ziet men de beeldjes in *dezelfde* richting als de trein bewegen.

Het beeld van een paal is boven veel breder dan onder: de lens verkleint de beelden des te meer naarmate ze een kleiner brandpuntafstand heeft, dus een sterker kromming. Aan de bovenzijde is onze druppel inderdaad veel vlakker dan aan de onderzijde.

## 28. Flonkeringen van het licht in dauwdruppels en rijpkristallen.

Wie kent niet de kleurige schitteringen van het licht in dauwdruppels? Merk op hoe rustig en fel ze schijnen aan de stevige, korte halmen van het grasveld, terwijl ze op de wuivende hoge grassen fonkelen als sterren.

Laten we een bedauwde grashalm van nabij bekijken. Pluk hem niet, raak hem niet aan! De kleine bolronde druppeltjes bevochtigen hem niet, zij liggen er capillair op, maar met een luchtlaagje tussen druppel en halm. Dat het bedauwde gras er zo grijs uitziet, komt door de terugkaatsing der lichtstralen tegen al die druppeltjes, zowel inwendig als uitwendig; een groot gedeelte der stralen bereikt dus niet eens het blad (vgl. § 168). Grote afgeplatte druppels glinsteren zilverachtig mooi onder nogal grote hoeken, omdat de stralen dan totaal teruggekaatst worden tegen de achterwand.

Kiezen wij een grote druppel en bekijken hem met één oog, dan verschijnen kleuren zodra we vanuit een voldoende grote hoek met de invalsrichting waarnemen; eerst verschijnt blauw, dan groen, dan het vooral duidelijke geel, oranje,

rood. Dit is natuurlijk wat we bij elke regenboog op grote schaal zien (§ 119).
Dergelijke schitteringen en kleuren vertonen ook de kristallen van rijp en verse sneeuw.
Vgl. § 129 en 154.

*Vraag aan Professor Clifton u te verklaren waarom een dauwdrop de tint van een groen blad of blauwe bloem tempert tot een zacht grijs, en zich als een lichtgevende schemering op het gras of op zuring vertoont; en waarom diezelfde druppel de kracht van alle warme kleuren versterkt, zodat u onmogelijk kunt beoordelen hoe de kleur is van een anjelier of van een roos tot u ze bedauwd ziet.*

*Ruskin, The Art of England*, **33**, 386.

*Rijp van goud .... zie de dauw op een koolblad, of, nog beter, op een grijs korstmos in de vroege zonneschijn.*

*Ruskin, Arrows of the Chase*, **34**, 536.

*Wanneer deze rijp van de takken stoof, schitterde hij in een rijkdom van kleuren in de zonnestralen.*

*M. Sjolochow, De Stille Don, blz.* 273.

# De kromming der lichtstralen in de dampkring.

## 29. Aardse straalkromming.

Wij zien de hemellichamen hoger boven de gezichteinder dan ze in werkelijkheid zijn; die verplaatsing is des te sterker naarmate ze meer tot de gezichteinder naderen. Vandaar de afplatting

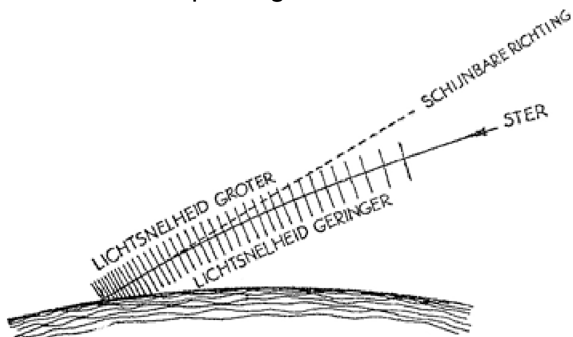



Fig. 36. Door de aardse straalkromming lijken de hemellichamen iets hoger te staan dan met de werkelijkheid overeenkomt.

van de Zon en de Maan bij de horizon: bij zonsondergang schijnt de onderrand van de zonneschijf gemiddeld 35 boogminuten hoger dan hij is; maar de bovenrand, die wat verder van de gezichteinder verwijderd is, slechts 29. De afplatting is dus 6 boogminuten, dit is ⅕ van de middellijn van de Zon. - We zien hier dus aanschouwelijk hoe de schijnbare opheffing naar de gezichteinder toeneemt. Dit verschijnsel is eenvoudig het gevolg van het toenemen der dichtheid van de dampkring in de diepere lagen; naarmate de dichtheid groter wordt, neemt de brekingsaanwijzer van de lucht toe en neemt de lichtsnelheid

af; wanneer dus de lichtgolven die door de ster uitgezonden zijn in onze dampkring dringen, lopen zij iets langzamer aan de zijde die het dichtst bij de Aarde is, en zwaaien geleidelijk om. De licht*stralen*, die aangeven hoe de *golffronten* zich voortplanten, krommen dus mede, en de verre voorwerpen ondergaan een schijnbare opheffing (fig. 36).

De aardse straalkromming is van dag tot dag veranderlijk, tengevolge van de wisselende temperatuurverdeling in de dampkring. Het zou heel belangwekkend zijn, voor een aantal dagen te bepalen hoe laat de Zon op- of ondergaat, en dit te vergelijken met de uit de almanakken of tabellen berekende tijden. Er moet gestreefd worden naar een nauwkeurigheid van 1 sekunde, wat door vergelijking met radioseinen wel bereikbaar is. Het schijnt dat men tijdsafwijkingen van 1, zelfs van 2 *minuten* kan verwachten! Vooral een waarnemer die aan ons zeestrand verblijft zou zulk een onderzoek goed kunnen uitvoeren, omdat men daar de zonsondergang boven een zuivere, vrije kim waarneemt. Een dergelijk onderzoek zou te combineren zijn met waarnemingen van de kimhoogte, van de vorm der zonneschijf en van de groene straal (zie § 30, 35, 36).

## 30. Buitengewone straalkromming zonder spiegeling.

Merk op, hoe dikwijls wij aan het strand de golven in de verte boven de horizonlijn zien uitkomen als verheffingen, terwijl

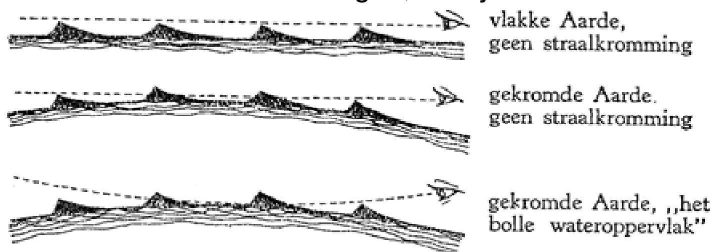



Fig. 37. Hoe wij zeegolven tegen de horizonlijn kunnen waarnemen.

dergelijke golven dichtbij ons niet tot de horizonlijn reiken; en toch moest de verbindingslijn van even hoge toppen waterpas zijn, en dus ook door de kim gaan. Ook gedurende een zeereis kan men dit verschijnsel bij zwaar weer geregeld waarnemen;

men vat post op een der lage dekken, zodat men de golven dichtbij zich niet geheel tot de kim ziet reiken, en vergelijkt dan met de golven op grote afstand. Het is duidelijk, dat onze waarneming alleen te verklaren is door de kromming der Aarde, welke wij hier vóór onze ogen als een werkelijkheid zien (fig. 37).

Het verschijnsel dat wij komen te beschrijven wordt echter gewijzigd door de aardse straalkromming. Sommige dagen is het buitengewoon uitgesproken, de gezichteinder schijnt nabij, de boten lijken ons verder dan gewoonlijk en groter; het is, alsof



Het onzichtbaar worden van verre voorwerpen; het wateroppervlak lijkt bol.



Het abnormaal zichtbaar worden van verre voorwerpen; het wateroppervlak lijkt hol.
Fig. 38.
(In beide schetsen is de kromming van de lichtstraal overdreven)

de kromming der Aarde versterkt was.

Andere dagen kunnen we ons verbeelden dat de rustige zee of een groot meer er uitzien als een holle schaal. Normaal onzichtbare voorwerpen worden zichtbaar, schijnen dichtbij en kleiner dan gewoonlijk. Verre boten die al op de horizonlijn moesten liggen, schijnen nog in een waterdal te varen; ze lijken in vertikale richting samengedrukt; de horizonlijn loopt boven hun romp, terwijl ons oog toch feitelijk minder hoog is dan de bovenkant van die romp. De gezichteinder schijnt abnormaal ver verwijderd.

Deze beide kenmerkende toestanden kunnen we noemen: *het bolle en het holle wateroppervlak*[1)] (fig. 38). De ene ontstaat als de dichtheid van beneden naar boven in de dampkring abnormaal langzaam afneemt of zelfs (voor de onderste luchtlagen) toeneemt; de andere ontstaat als de dichtheid van beneden naar boven abnormaal snel afneemt. Zulke anomalieën zijn het gevolg van uitzonderlijke temperatuurverdeling. Is de zee warmer dan de lucht, dan worden de onderste luchtlagen warmer dan de hogere, worden dus optisch ijler en minder lichtbrekend; de lichtstralen krommen van de Aarde af. Is de

1) C.R. **153**, 1054, 1911. - Proc. R. Soc. Edinb. **32**, 175, 1912.

zee kouder, dan ontstaat de omgekeerde kromming. Het is zaak om op zulke dagen de temperatuur op verschillende hoogte te meten, en te zien of men daaruit de waarnemingen verklaren kan.

Er is nog een kenmerk waardoor die beide optische toestanden zich van elkaar onderscheiden: het is de schijnbare hoogte van de gezichteinder. Om die zonder instrumenten waar te nemen, moeten we een vast mikpunt A kiezen nabij het strand, en een veranderlijk mikpunt B op een paal of boomstam, op een honderdtal meters landinwaarts (fig. 39). We kijken van uit B, en zoeken

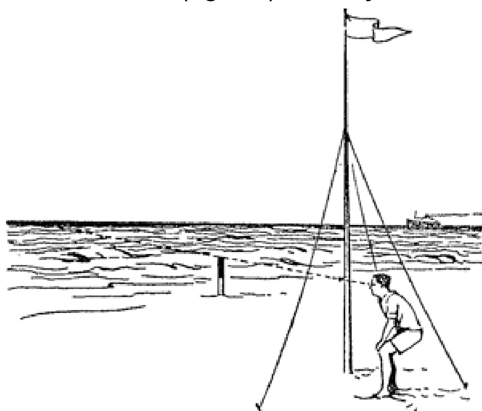


Fig. 39. Het meten van de veranderingen der aardse straalkromming.

op welke hoogte we ons oog moeten houden om de gezichteinder nauwkeurig door het punt A te zien gaan. Als het water kouder is dan de lucht, lijkt de gezichteinder hoger en B daalt; als het water warmer is dan de lucht, lijkt de gezichteinder lager en B stijgt. Verschillen van 6' zelfs 9' in de ene of in de andere richting komen soms voor, vooral bij windstilte; bij een afstand AB = 100 m komen ze overeen met een hoogteverschil van ± 20 en 30 cm. - Deze waarneming zou nauwkeuriger worden, als ze kon geschieden met een toneelkijkertje.

In uiterst zeldzame gevallen wordt de kromming der lichtstralen in de dampkring buitengewoon sterk en geeft dan aanleiding tot de merkwaardigste optische verschijnselen. Soms komen er dagen voor van buitengewone zichtbaarheid, waarop ineens een ver verwijderde stad of een vuurtoren duidelijk zichtbaar worden, die men in normale omstandigheden nooit kon waarnemen omdat ze achter de kim liggen. Dikwijls krijgt men dan tevens de indruk dat ze verrassend dicht bij ons zijn. De zeeman spreekt van ‘opdoeming’. Een dergelijk geval is bijvoorbeeld op de Zuiderzee in de buurt van Stavoren waargenomen, waar men Enkhuizen en Urk verrassend dichtbij zag

liggen[1]; en van de Zuiderzeedijk bij Amsterdam uit, waar het eiland Pampus eens beneden de kim in plaats van op de kim te zien was.[2]

Omgekeerd zijn er gevallen waarin verre voorwerpen, die gewoonlijk boven de gezichteinder uitsteken, verdwijnen alsof ze achter de kim lagen. Ook in dit geval krijgt men meestal de indruk van grote nabijheid.

Dergelijke waarnemingen moeten altijd gepaard gaan met het meten der temperatuur van het zee-oppervlak en van de lucht.

*Men had haar (de stervende 90-jarige Trien Jans) volgens haar wens in de kussens rechtop laten zitten, en haar ogen gingen door de kleine, in lood gevatte ruitjes naar de verte. Er moest ginder een ijlere luchtlaag boven een dichtere liggen, want er was sterke kimming, en de straalbreking hief op dit ogenblik de zee als een fonkelende zilveren strook boven de rand van de dijk, zodat het licht verblindend in de kamer scheen; ook de zuidpunt van Jeverszand was zichtbaar.*
*Th. Storm, Der Schimmelreiter*.

## 31. Luchtspiegelingen op kleine schaal. (Plaat Vb).

De beroemde luchtspiegeling van de woestijn is gemakkelijk op kleine schaal waar te nemen. We zoeken een tenminste 8 meter lange effen muur, of een stenen borstwering, die naar 't Zuiden gekeerd is, en wachten op zonnig weer. Nu leggen we ons hoofd vlak tegen de muur en kijken rakelings er langs, terwijl iemand op zo groot mogelijke afstand een helder voorwerp dichter en dichter bij de muur houdt; een eenvoudige sleutel, schitterend in het zonlicht, is bijvoorbeeld zeer geschikt. Zodra de sleutel op enige cm van de muur komt, zien we hoe het beeld zich merkwaardig vervormt, en hoe een 'weerspiegeld' beeld van de kant van de muur naar de sleutel toe schijnt te komen; dikwijls kan men zelfs de hele hand die de sleutel houdt mee weerspiegeld zien. Heeft men eenmaal het verschijnsel goed waargenomen, dan kan men het opmerken aan alle verre voorwerpen die rakelings langs de muur te zien zijn. Bij kortere muren is de luchtspiegeling ook nog wel waar te nemen, als het oog er *vlak* bij

1) Onweders enz. **47**, 52, 1926.
2) Onweders enz. **42**, 37, 1921. Een ander, ietwat fantastisch geval is waargenomen te Drachten: Hemel en Dampkring **13**, 70, 1915.

kan komen: dit is het geval, als men bij het uiteinde van de muur voldoende vrije ruimte heeft, zodat men zich daar kan stellen.

Bij zeer lange muren die sterk verhit zijn, kan men soms na het le spiegelbeeld nog een 2e spiegelbeeld waarnemen, niet *symmetrisch* t.o.v. het voorwerp, maar er aan *gelijk*.[1] Dit komt uit met een algemene wet, die leert dat de achtereenvolgende beelden ener luchtspiegeling om de beurt omgekeerd en rechtopstaand moeten zijn. (Plaat Vb).

De spiegeling ontstaat, doordat de lucht nabij het verhitte voorwerp warmer is, dus ijler, en dus een geringer brekingsindex

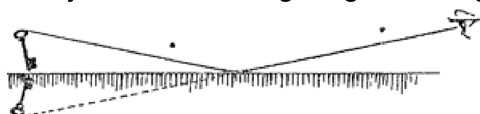


Fig. 40. Luchtspiegeling langs een door de zon beschenen muur (de vertikale afmetingen zijn duidelijkheidshalve sterk overdreven).

heeft. Hierdoorkrommen de lichtstralen, tot zij evenwijdig aan het oppervlak lopen en zich er daarna weer van verwijderen (fig.40). Ten onrechte wordt soms van 'totale terugkaatsing' gesproken, terwijl de overgang tussen de verschillende lagen toch overal geleidelijk is; maar anderzijds moet wel bedacht worden dat de straal zijn kromming bijna geheel krijgt in de onmiddellijke nabijheid van het hete voorwerp. Waarschijnlijk is er vlak langs de muur een luchtlaagje van enkele mm dikte, dat ongeveer de temperatuur van de vaste wand heeft; daarna valt de temperatuur eerst snel, dan langzamer af.

Het is de moeite waard, te beproeven de temperatuur van de muur en van de naburige luchtlagen op te nemen, en te laten zien dat de waargenomen krommingen van de stralen hierdoor quantitatief verklaard worden.

Dergelijke luchtspiegelingen op kleine schaal zijn vroeger waargenomen langs de hete schoorsteen van stoomboten[2]; men zag de Maan, Jupiter, de opgaande zon weerspiegeld als in een zilveren spiegel, de mast van het schip daarentegen vertoonde het verschijnsel niet. Maar ik geloof niet dat de pijp van moderne schepen heet genoeg wordt om deze waarneming toe te laten.

Boven de kap van een auto, die een tijdje in de zon gestaan

1) W. Hiller, Phys. Zs. **14**, 718, 1913; **15**, 303, 1914.
2) Ball, Phil. Mag. **35**, 404, 1868. - Ann. d. Phys. (Pogg.) **134**, 336, 1868.

heeft, is een duidelijke vervorming van de beelden van verre voorwerpen merkbaar, mits men rakelings langs het verhitte oppervlak kijkt. Reeds boven een plankje van 50 cm lengte dat zich in de zon bevindt, kan men soms al zien hoe alle voorwerpen als 't ware uitgerekt worden en door het plankje ‘aangetrokken’.

## 32. Luchtspiegelingen op grote schaal boven warme oppervlakken. (Plaat Va).[1)]

De vlakheid van het terrein en de waarneming op grote afstand is voor het tot stand komen der luchtspiegeling tenminste even belangrijk als de sterke verhitting van de grond. Vandaar dat ons effene land zo buitengewoon geschikt is voor deze soort waarnemingen, en de luchtspiegeling dikwijls even mooi vertoont als de verzengde Sahara. Dikwijls ziet men de luchtspiegelingen alleen wanneer men zich bukt; ze worden ineens vele malen duidelijker en blijken verrassend dikwijls voor te komen, als men maar een toneel- of veldkijkertje gebruikt en vaak de gezichteinder onderzoekt. - Wij zullen thans een drietal gevallen beschrijven, waarin het verschijnsel buitengewoon veelvuldig en duidelijk optreedt.

*Boven lange, vlakke wegen die met asfalt bekleed zijn* is de luchtspiegeling op iedere zonnige dag waar te nemen; de thermometer kan een temperatuurverval van wel $20^{o}$ of $30^{o}$ aanwijzen in de eerste centimeter boven het oppervlak, daarna wordt de gradiënt een paar graden per cm.[2)] Naar mijn ervaring is de luchtspiegeling nog prachtiger op onze moderne rechte *betonwegen* (Amsterdam-IJmuiden, Hilversum-Bussum); wel wordt de zonnestraling slechter geabsorbeerd dan bij de geasfalteerde wegen, maar blijkbaar is de warmte-afgifte ook geringer. Bij zonnig weer schijnt zulk een weg in de verte met plassen water bedekt, die groter en duidelijker worden als men zich bukt, en waarin zich de helder gekleurde verre voorwerpen schijnen te spiegelen. Wat wij voor water houden is niets anders

1) Uitvoerige litteratuur! Zie natuurlijk eerst: Pernter-Exner, t.a.pl. - Verder: Biot, Mém. de la Classe des Sc. math. et phys. de l'Institut de France, 246, 1809. - Trans. Edinb. Soc. 30, 551, 1883. - Fr. Nölke, Phys. Zs. 18, 134, 1917. - A. Wegener, Ann. d. Phys. 57, 203, 1918. - R. Meyer, Met. Zs. 52, 405, 1935.

2) H. Futi, Geophys. Mag. **4**, 387, 1931. - L.A. Ramdas & S.L. Malurkar, Nat. **129**, 6, 1932.

dan de weerspiegeling van de heldere hemel in de verte. Het is merkwaardig, dat de luchtspiegeling helemaal niet verstoord wordt door het drukke verkeer, waardoor toch papier, stof, bladeren opgewerveld worden!

*In de uitgestrekte weiden* van Noord-Holland of van het Veurne-Ambacht, op de vlakke Friese maaivelden, *is de luchtspiegeling een geheel normaal verschijnsel, ja zelfs een kenmerkende trek van een landschap*, althans in het voorjaar en de zomer, bij enigszins helder weer en niet teveel wind.[1] Een der beste waarnemingspunten ligt onmiddellijk ten Westen van Heilo (bij Alkmaar), waar het uitzicht geheel vrij is. Men ziet een witte streep aan de gezichteinder, waarboven de verre torens en boomtoppen als 't ware zonder ondergrond zweven. Bukt men zich, dan ziet men het landschap dichterbij vervormd, en daar verschijnen grote blinkende 'waterplassen'[2], waarin zich de huizen en molens spiegelen met de lichte hemel als achtergrond; vooral aan de zonzijde is dit zeer duidelijk. Tegen de middag is dikwijls de kromming der lichtstralen zo sterk, dat men reeds staande overal plassen meent te zien; ook dan is het zeer de moeite waard zich te bukken of een paar meter hoog te stijgen, om te zien hoe de plassen zich schijnen uit te breiden of samen te trekken. Merk op hoe de beelden zich vervormen en vertikaal uitgerekt worden als het oog nog net iets te hoog is om de terugkaatsing te zien. Houdt men het oog zéér laag, dan ziet men de basis der verre voorwerpen niet meer, zij zweven boven een ledige ruimte. Aan de zijde die van de zon afgekeerd is zijn de waterplassen minder helder, vallen dus niet zo op; maar des te mooier ziet men de vervorming der verre voorwerpen en hun spiegelbeelden. Het is belangwekkend, enkele temperaturen op te nemen in de onderste luchtlagen, bijvoorbeeld op 100, 50, 25, 10 en 0 cm hoogte. Des ochtends, als de zon schijnt, vindt men dan geregeld dat de temperatuur dicht bij de grond het hoogste is; bedraagt het verschil (tussen 100 en 0 cm) $3^o$, dan is er weinig of geen luchtspiegeling; stijgt het tot $5^o$, dan is er matige luchtspiegeling; bij $8^o$ is het verschijnsel sterk. De sterkste verschillen krijgt men in de lente op een zonnige, heldere dag, volgend op een killen nacht. - Het is over de uitgestrekte weiden bij Bremen dat Busch, de eerste die de luchtspiegeling

1) K. Braak, Tijdschr. Kon. Ned. Aardr. Genootschap, **39**, 587, 1922.
2) In Oost-Friesland spreekt men van 'mooi weer-katjes' (Das Wetter, **33**, 22, 1916).

wetenschappelijk en grondig bestudeerde, in 1779 het spiegelbeeld der verre stad duidelijk kon waarnemen.

Het mooist en het regelmatigst is *de luchtspiegeling aan het strand, over vast en effen zand*, bij warm en windstil weer.[1] We leggen ons plat op de grond, het oog zo dicht mogelijk bij het oppervlak van het zand, en zien dan geen duidelijk gespiegeld beeld; houden we echter 't hoofd iets hoger, dan krijgen we ineens de merkwaardige indruk dat we omgeven zijn door een vijvertje, waarin de voorwerpen weerkaatst worden: voorwerpen van 10 of 20 cm hoog op 30 m afstand ziet men al weerspiegeld. We kiezen een duidelijk, helder voorwerp H, en houden het oog in een vast punt W bv. even hoog boven het zand als het voorwerp, hetgeen gemakkelijk door een takje of

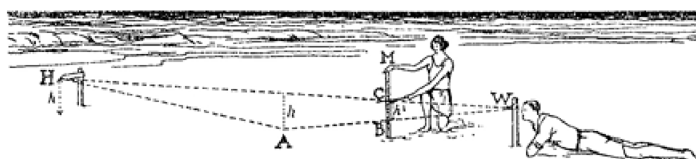
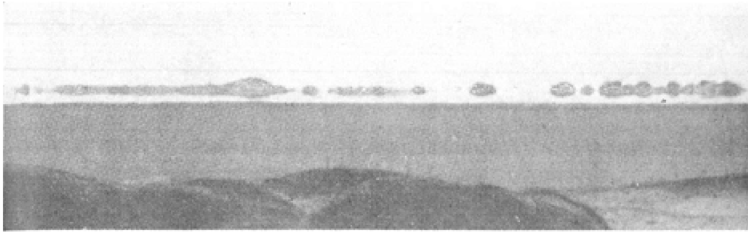



Fig. 41. Hoe we bij een luchtspiegeling de weg kunnen bepalen die de lichtstralen gevolgd hebben.[2]

stokje aan te geven is. Nu bepalen we experimenteel de baan van de lichtstraal die ons het spiegelbeeld doet zien: een helper houdt een meetlatje M op bekende afstand in C en verschuift een staafje tot dit voor ons oog *a*) in B net het spiegelbeeld afschermt, *b*) de top van het voorwerp zelf afschermt. We mogen aannemen dat de direkte lichtstraal WH van ons oog naar H rechtlijnig is; achtereenvolgens kan dus de hoogte van de geknikte lichtstraal WAH en zijn gehele baan punt na punt bepaald worden. Zo vinden we dat hij betrekkelijk plotseling, dicht bij het zandoppervlak, een knik moet hebben gekregen. Als dit waar is, verwachten we dat $h/AW = h'/BW$ constant zal zijn, en gelijk aan de hoek die de lichtstraal over het grootste gedeelte zijner baan met het zandoppervlak maakt. Dit blijkt inderdaad uit te komen; men vindt hoeken tot $1^\circ$. Uit deze hoek en de

1) L.G. Vedy, Met. Mag. **63**, 249, 1928. - Hemel en Dampkring, **15**, 71, 1917. Nergens zo *treffend mooi* waar te nemen als over de ontzaglijke zandplaten onzer Noordzee-eilanden, bv. over de 8 km lange Vliehors (W.-Vlieland).

2) Alle horizontale afmetingen zijn veel te klein voorgesteld.



PLAAT V
Luchtspiegeling in de woestijn bij het Suez-kanaal. De lage zandheuvels lijken weerspiegeld in een wateroppervlak; de schijnbare horizon ligt 4'½ onder de verdwijnlijn.
Naar W.H. Steavenson, Quart. Journ. **47**, 15, 1920, met teleobjectief, aequiv. *f* = 90 cm; 1,8 maal vergroot.



Luchtspiegeling langs een door de zon beschenen lange muur. Van den knaap (160 m van den waarnemer verwijderd) is een spiegelbeeld zichtbaar, en zelfs het begin van een abnormaal tweede spiegelbeeld; de muur was 4,5$^{o}$ C heter dan de lucht.
Naar W. Hillers, Phys. Zs. **14**, 718, 1913.

bekende brekingsindex van lucht voor verschillende temperaturen leidt men af hoeveel graden heter de lucht vlak bij de grond is dan op ooghoogte:

$$\Delta t = \frac{273}{29 \,.\, 10^{-5}} \cdot \frac{1}{2}\left(\frac{h}{AW}\right)^2$$

, hetgeen in de praktijk 5° tot 35° kan worden.




Fig. 42. Bij de luchtspiegeling wordt slechts een gedeelte van het voorwerp weerspiegeld gezien. *a*. op kleine afstanden.

In vorig geval is het ontstaan van de luchtspiegeling zeer eenvoudig. Zodra ik mijn blik richt naar een punt van de grond verder dan een zekere grens, treft de gezichtsstraal de hete lagen onder een voldoende schuine hoek om vrij plotseling geknikt te worden; het effekt is ongeveer hetzelfde alsof van daar af de grond met een spiegel bedekt was. Verre voorwerpen worden aldus in twee delen verdeeld: het bovenste wordt enkel gezien, het onderste geeft een omgekeerd spiegelbeeld (fig. 42*a*).

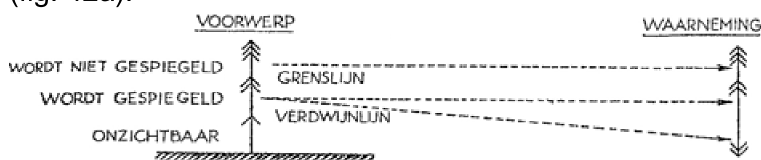



Fig. 42. *b*. op grote afstanden.

Bij luchtspiegeling op grote afstanden spelen de kromming der Aarde en de gewone straalkromming een zeer merkbare rol; beneden een zekere *verdwijnlijn* wordt de voet van de verre voorwerpen onzichtbaar tengevolge van de kromming der Aarde; tussen die verdwijnlijn en een hoger gelegen *grenslijn* bevindt zich het gedeelte van het voorwerp dat weerspiegeld wordt gezien, en waarvan het spiegelbeeld meestal iets in vertikale richting samengedrukt is; boven de grenslijn tenslotte zien we de voorwerpen waarvan geen spiegelbeeld ontstaat (fig. 42*b*).

In plaats van de snelle temperatuursprong bij het aardoppervlak zijn er veel ingewikkelder temperatuurverdelingen denkbaar, die ieder weer hun bijzondere optische gevolgen hebben. Bij sterke luchtspiegeling over het strand kan men door een proef-

ondervindelijk onderzoek, zoals wij het beschreven, uitmaken hoe de verdwijnlijn en de grenslijn lopen, en daaruit de temperatuurverdeling afleiden. Rechtstreekse temperatuurmetingen zijn hiermee te vergelijken. Maar zulke onderzoekingen zijn moeilijk, omdat het altijd mogelijk is dat het strand niet geheel waterpas verloopt.

Bij elke zeereis ziet men tal van luchtspiegelingen, die door vorige beschouwingen begrepen kunnen worden (fig. 43, 44). Als het verschijnsel weinig ontwikkeld is, zoals gewoonlijk, wordt het gespiegelde (omgekeerde) beeld zó afgeplat, dat het

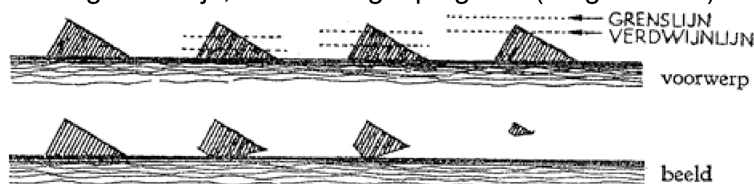



Fig. 43. Een eiland, gezien van toenemende afstanden bij luchtspiegeling.

slechts een horizontaal lijntje lijkt dat met de basis van het voorwerp ineenvloeit. Het enige wat nu nog opvalt, is de heldere lichtstreep van de gespiegelde hemel, waaraan men natuurlijk de samendrukking niet bemerkt. De verre voorwerpen schijnen dus als 't ware op een kleine hoogte boven de gezichteinder te zweven. Dit optisch verschijnsel, dat niets anders is dan een weinig ontwikkelde luchtspiegeling, is haast dagelijks op zee waar te nemen, vooral wanneer men gebruik maakt van een kijkertje. Zo kan men bijna steeds van de Zuiderzeekust of van Amsterdam uit Urk, Marken en Pampus zien.[1)] Als de verschillende delen van een eiland ongelijk ver van ons verwijderd zijn, worden de verste delen het hoogst door de grens- en verdwijnlijn getroffen, en ontstaat fig. 44*d*.

De meting van de hoogte der verdwijnlijn boven de schijnbare gezichteinder is een eenvoudig middel om de ‘sterkte’ der luchtspiegeling in getalmaat uit te drukken; zij kan geschieden met een der methodes, aangegeven in het aanhangsel, § 235. Men vindt hoeken van enkele boogminuten.

Soms treedt een ander verschijnsel op dat men hiermede zou kunnen verwarren: een laag fijne waterdruppeltjes, afkomstig van de branding, die boven de zee zweeft en de onderste gedeelten der verre voorwerpen met een laag lichte nevel bedekt.

1) ‘*Dat is het wonderbaarlijke van deze eilanden, dat zij in straalbreking zich los van de zee schijnen te maken, en daarboven zweven gaan, alsof zij er heel licht en sprookjesachtig dreven in de ruimte van den aether*’. (H.v. Wermeskerken, Terschelling).

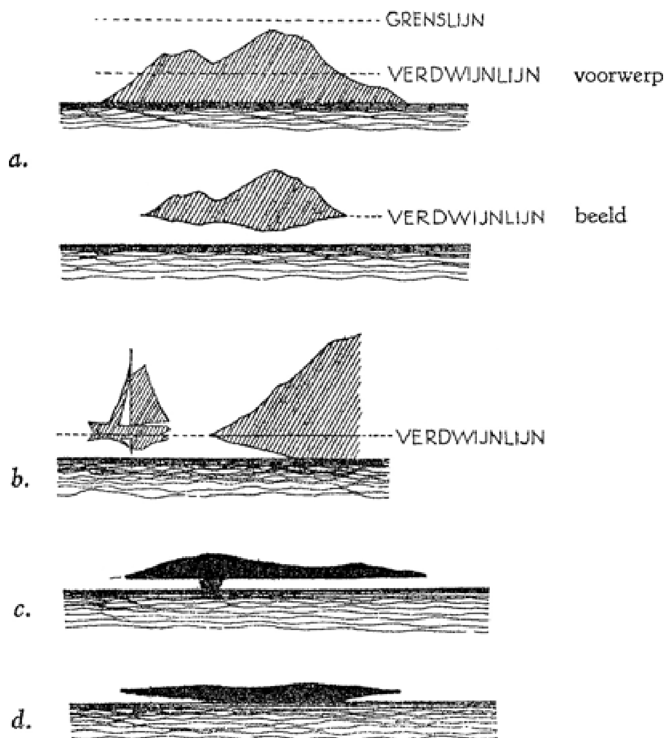



Fig. 44. Waarnemingen van de luchtspiegeling gedurende een zeereis.

Luchtspiegelingen, met vervorming der beelden en terugkaatsing, zijn nog in de volgende omstandigheden waargenomen:
bij het baden, als het water warmer is dan de lucht;
op de grote meren van Z.W.-Friesland; het verschijnsel wordt daar ‘tillen’ genoemd;

boven spoorbanen: als men zich bukt ziet men hoe een lokomotief in de verte helemaal vervormd lijkt;
boven vlakke geestgronden of vlakke zwarte bouwgrond;
langs duinhellingen, als men evenwijdig aan de helling kijkt;
langs gewone stadsstraten, met stenen geplaveid, vooral wanneer men rakelings langs de hoogste top ener helling kan kijken.

## 33. Luchtspiegelingen over koud water (soms 'kimming' genoemd).

Zoals de spiegeling naar beneden vooral optreedt over het verwarmde land, is de spiegeling naar boven voornamelijk over zee waar te nemen[1)] (ofschoon veel zeldzamer). Zij ontstaat, wanneer de zee veel kouder is dan de lucht, zodat de temperatuur in de onderste luchtlagen buitengewoon snel met de hoogte afneemt (fig. 45). Over de Oostzee, als die pas ontdooid is in de lente, ziet men er merkwaardige voorbeelden van. Er is grote

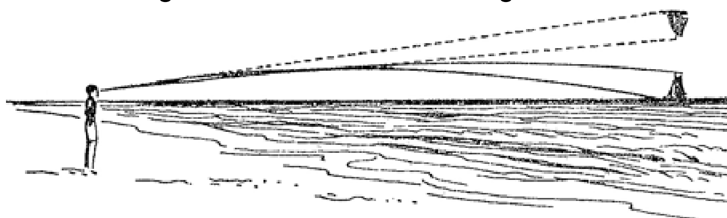


Fig. 45. Het ontstaan der zeldzame luchtspiegeling naar boven.

kans dat zij in ons vlakke land prachtig gezien zal kunnen worden over grote ijsvlakten, wanneer het plotseling gaat dooien, en de lucht vlak bij het ijs kouder is dan daarboven; men zal echter moeten bukken en het oog dicht bij het ijsoppervlak houden.

Bij de straalkromming naar boven kent men meervoudige spiegelingen, die zich hier vrij kunnen ontwikkelen omdat niets de lichtstralen afsnijdt (zoals de aarde deed bij spiegeling naar beneden); wonderlijke beelden, recht en omgekeerd, van ogenblik tot ogenblik wisselend, veranderlijk volgens de afstand van het voorwerp en de toevallige temperatuurverdeling in de dampkring.

## 34. Luchtkastelen.

In sommige zeer zeldzame gevallen hebben betrouwbare waarnemers allermerkwaardigste luchtspiegelingen gezien, die ze beschrijven als: landschappen met steden en torens en gekanteelde muren, oprijzend boven de gezichteinder, zich vervormend, ineenstortend; sprookjesachtige taferelen die ons met een diep geluk vervullen en met onbedwingbaar verlangen; 'fata morgana'! Het is niet te verwonderen dat poëzie en volks-

1) Een voorbeeld van zulk een waarneming nabij Texel, in Onweders, enz. **14**, 63, 1893.

verhalen de fraaie waarneming nog hebben opgesmukt met rijke fantasie.
Forel heeft dit verschijnsel in eenvoudiger vormen talloze

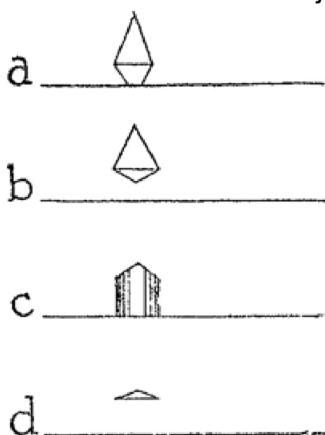



Fig. 46. Het ontstaan der 'fata morgana' als overgang tussen de straalbreking boven warm en boven koud water.

malen waargenomen over het meer van Genève, en het na 50 jaar studie nauwkeurig beschreven.[1)] Een rustig wateroppervlak van 10-30 Km is nodig; het oog moet zich 2 tot 4 m boven het water bevinden, de juiste hoogte moet door beproeven gevonden worden en komt er erg op aan. 's Namiddags, op heldere dagen, als het water warmer was dan de lucht, zag Forel vier stadia naast elkaar die zich geleidelijk langs de verre oever van het meer verplaatsten en elkaar verdrongen, niet langer dan 10 of 20 minuten op dezelfde plaats blijvend.

*a.* De luchtspiegeling over warm water; spiegelbeeld onder het voorwerp;
*b.* De abnormale luchtspiegeling over koud water, een zeer vreemd verschijnsel, waarbij het voorwerp normaal gezien wordt, en het spiegelbeeld daaronder sterk samengedrukt is (waarschijnlijk een labiele, tijdelijke overgangsvorm);
*c.* De luchtkastelen: men ziet de verre kustlijn vervormd over een afstand van 10$^{o}$ tot 20$^{o}$ (in hoekmaat), uitgerekt tot vertikale, naast elkaar geplaatste rechthoekjes ('zone striée').
*d.* De normale straalkromming over koud water: er is geen spiegelbeeld te zien, maar het voorwerp zelf is in vertikale richting sterk samengedrukt.

De verhoogde horizonlijn van de stadia *a-b* en de lagere horizonlijn van stadium *d* zijn de grenzen tussen dewelke zich de vertikale arcering der zone striée ontwikkelt (fig. 47); de verplaatsing van de luchtkastelen ontstaat doordat het refractietype *d* het type *a* geleidelijk verdringt. Het schijnt wel aannemelijk, dat juist in een dergelijk overgangsgebied de dichtheid der lucht in gemiddeld hoge lagen het grootst zal zijn. In dit geval

1) F.A. Forel, Proc. R. Soc. Edinb. **32**, 175, 1912. - Vgl. ook: Arch. sc. phys. nat. **3**, 545, 1897. - C.R. **153**, 1054, 1911.

krijgt men de stralengang van fig. 47, en wordt dus elk lichtpunt

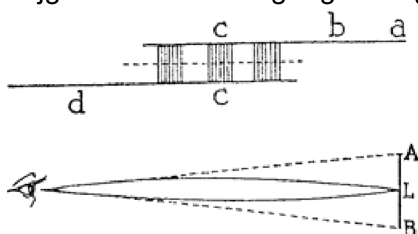



Fig. 47. Het ontstaan der 'fata morgana'.

L vertikaal uitgerekt tot een vertikaal lijntje AB.

Men kan zich afvragen of er geen kans is de typische fata morgana in onze vlakke landen terug te vinden. Wij kennen althans twee goede voorbeelden ervan.

'Verleden Vrijdag (12 Sept. 1917) omstreeks 7 uur stonden we met ons drieën bij de driehoeksmeter te Schoorl.

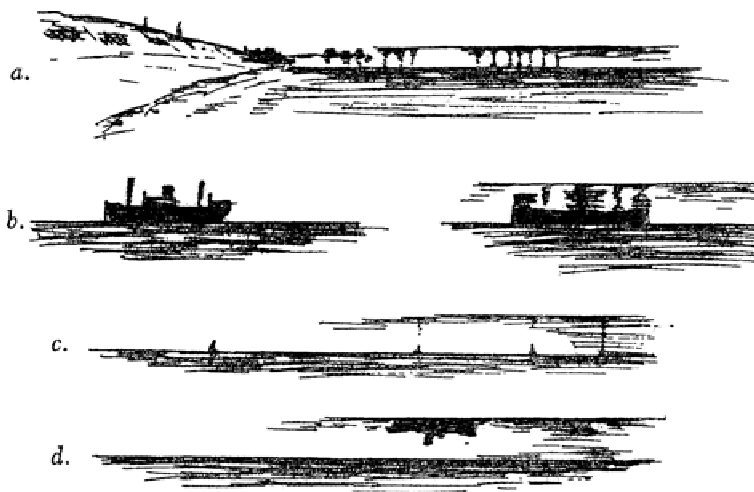



Fig. 48. Luchtkastelen, waargenomen te Zandvoort. Naar Hemel en Dampkring, **31**, 252, 1933.
Cliché in bruikleen van het Kon. Ned. Meteor. Instituut.
*a.* Noordwijk, Katwijk, Scheveningen, in de zone striée: 'een palmenwoud'!
*b.* Uitvarend stoomschip, links vrij van spiegeling, rechts in het gebied der fata morgana.
*c.* Zeilscheepjes.
*d.* Stoomschip achter de kim, onzichtbaar, alleen in luchtspiegeling te zien.
Het omgekeerde beeld hangt aan de bovenste horizon.

Zo, dat we naar zee keken, zagen we plotseling op enige afstand, doch heel dichtbij, een stad verrijzen; bomen en huizen waren sterk afgelijnd, terwijl de huizen heel hoog waren. Zagen we de stad in werkelijkheid, dan zouden we precies kunnen zeggen: die is het.'[1)]

Nog veel mooier is de volgende prachtige beschrijving, waar de Nederlandse waarnemer bij de éne, uitzonderlijke gelegenheid die hem geboden was, bijna alle kenmerkende trekken heeft opgemerkt die Forel vermeldt. - 'Toen ik om 16.20 (zomer-tijd) aan het strand te Zandvoort kwam, viel mij terstond het ongelijke niveau van de horizon op. Deze bevond zich in het NW. en W. merkbaar hoger dan in het ZW., op vele plaatsen waren twee horizonten boven elkaar zichtbaar, die enerzijds in het hogere niveau van W. en NW., anderzijds in het lagere niveau van ZW. overgingen. De onderlinge afstand was overal vrijwel dezelfde, circa 7' (2 mm op armlengte afstand van het oog). Voorwerpen die zich tussen de twee niveau's in bevonden, ondergingen eigenaardige vormveranderingen, waardoor allerlei bedriegelijke schijnbeelden ontstonden.'[2)] Zie fig. 48.

*Maar gaandeweg verliest het landschap*
*Zijn troosteloosheid voor haar ogen*;
*En ze ziet hoe daar verre aan het golven gaat*
*Een grote lichte watervlakte*.
*De struiken en de waterplanten*
*Omzomen 't overstroomde landschap*,
*En ze groeien en hullen in schaduw hun top*.

*Het is een schouwspel fris en hemels*,
*Een wonderdroombeeld uit het Oosten!*
*Allengskens in de verte langs 't blauwende meer*
*Verrijst een stad met hare wallen*,
*Haar ring van trots versterkte muren*,
*Haar kerken, daken en fonteinen*,
*En haar torens die groeien in 't licht van de zon!*

*De grote schepen en de kleine*,
*Met hunne ranke blanke zeilen*,
*Komen binnengevaren; en de wind in zijn spel*
*Doet lichtjes wappren op de masten*
*De vlaggen en de kleurenwimpels*.

*Fr. Mistral, Mireio, X, strofe* 15-17.

1) Mejuffrouw Zevenhuizen-Dil; zie Onweders enz. **40**, 46, 1919.
2) J. Pinkhof, Hemel en Dampkring **31**, 252, 1933; Onweders, enz. **54**, 40, 1933.

## 35. Vervormingen van de op- en ondergaande Zon en Maan[1] (Plaat VI).

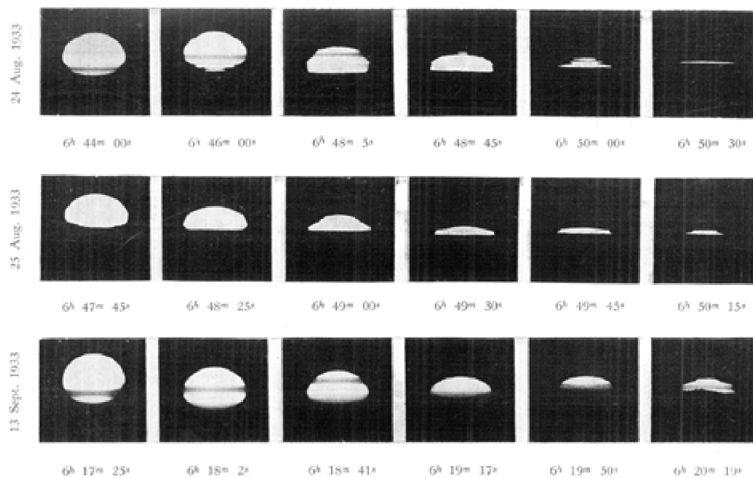
Bij lage zon ziet men soms de merkwaardigste vervormingen: dikwijls zijn de hoeken van het zichtbare segment afgerond, of de schijf schijnt uit twee samengevoegde stukken te bestaan, of men ziet onder de zon een lichtstreep die opstijgt terwijl de zonneschijf daalt; in andere gevallen gaat de zon niet nauwkeurig achter de gezichteinder onder, maar reeds enkele boogminuten hoger. Het schijnt dat deze vervormingen 's avonds afgewisselder zijn dan 's ochtends, wat aan meteorologische faktoren te wijten is (vgl. § 193); op windstille, wolkenloze dagen vormen zich de lagen van verschillende dichtheid het rustigst, zodat de vervormingen van de zonsrand beschouwd kunnen worden als een aanwijzing voor een stabiele toestand van de dampkring en een voorteken van goed weer. Is de zon te fel, dan houde men voor het oog een blaadje stanniol of gewoon papier, waarin een zuiver rond gaatje geprikt is, of gebruike een donker 'lasglas'. Een toneelkijker is niet nodig, maar vergemakkelijkt de waarneming; men houde een goed donker glaasje voor de ogen (niet voor het objektief!), of gebruike ook hier het speldeprik-diafragma.

Het belangwekkendste gedeelte der verschijnselen begint meestal slechts 10 minuten vóór zonsondergang (of duurt tot 10 min. na zonsopgang). Bemerk tevens de kleurschakeringen der zonneschijf, die aan de zijde van de gezichteinder diep rood is, en waarvan de hogere delen geleidelijk in oranje en geel overgaan. Let ook op grote zonnevlekken die soms aanwezig zijn op de schijf, en die men tot 'paaltjes' uitgerekt kan zien.[2]

Het fotograferen is interessant maar moeilijk; een gewone camera geeft veel te kleine zonnebeeldjes, alleen met een kijker van bv. 75 cm brandpuntafstand en 3 tot 10 cm opening krijgt men bruikbare opnamen, die minder dan 1 sekunde te belichten zijn. Deze belichtingstijd is zo kort, dat meebewegen van de kijker niet nodig is. Gebruik panchromatische platen en raadpleeg nog de litteratuur! (Vgl. Plaat VI.)

1) A.L. Colton, Contrib. Lick Obs., 1, 1895. - A. Riccò, Mem. spettr. ital. 30, 96, 1901. - Prinz, ibid. 31, 36, 1902. - Arctowski, ibid, 31, 190, 1902. - Wegener, Beitr. z. Phys. d. freien Atmosph., 4, 26, 1912. - A. Bracke: Déformations du Soleil (Mons, 1907), met litteratuur. - P.A.S.P. 45, 270, 1933. - Enz.

2) Havinga, Hemel en Dampkring, **19**, 161, 1922.




PLAAT VI.
De ondergaande zon, vervormd door aardse straalkromming.
(Gefotografeerd met een lens van 1,50 m brandpuntsafstand, 5 cm middellijn, op panchromatische portretfilm, belichtingstijd 1/825 tot ⅕ sec.).
Naar J.F. Chapell, P.A.S.P. **45**, 281, 1933.

De oorzaak dezer optische vervormingen is niets anders dan de gewone luchtspiegeling; en wel onderscheiden we weer de luchtspiegeling naar boven en naar beneden. We krijgen een goede benadering van de werkelijkheid, als we (met Wegener) aannemen dat de lichtstraal die van de Zon komt *plotseling* geknikt wordt bij een diskontinuïteitslaag.

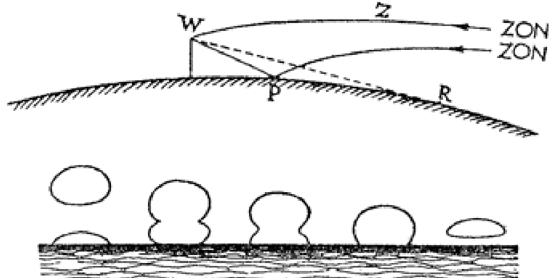



Fig. 49. Zonsondergang met vervormingen door luchtspiegeling volgens ‘geval 1’.

*Geval 1* (fig. 49): op de aarde rust een dunne laag warme

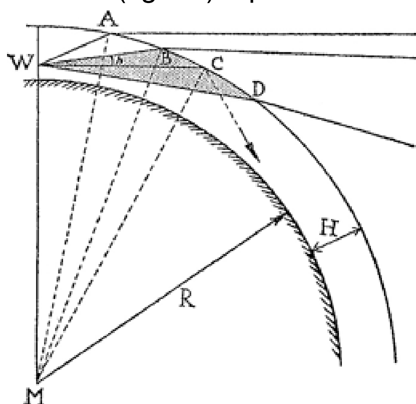



Fig. 50.

lucht PR, op de wijze zoals wij dit aangenomen hebben in fig. 49. We zien dus de Zon in de richting WZ. en tegelijk daaronder het gespiegelde beeld in de richting WP, terwijl de kim daartussen ligt (WR). Bij zonsondergang rijst er uit de schijnbare kim WP een afgeplatte tegenzon op, naarmate de Zon zelf daalt; ze verenigen zich op de plaats waar de echte Zon straks zal verdwijnen (WR). Dan schuiven de twee schijven steeds meer in elkaar, terwijl ‘ballonvormen’ enz. ontstaan.

*Geval 2* (fig. 50): nu nemen we aan dat de lucht bij de grond kouder is, terwijl daarboven een warmere laag ABCD ligt (inversie.) Het punt M is het middenpunt der Aarde, waar omheen

twee cirkelbogen het niveau der zee en dat van de diskontinuïteitslaag weergeven. Stel u voor dat de waarnemer W in steeds vlakker richtingen gaat kijken: in de richting WA bereikt zijn blik de bovenrand van de Zon; in de richting WB ziet hij een iets lager punt, maar zijn blik valt al schuiner op de diskontinuïteitslaag; in de horizontale richting WC ontmoet hij de laag onder een zó grote invalshoek, dat de gezichtsstraal omgebogen wordt en niet meer de Aarde verlaten kan. Staat de waarnemer op een kleine hoogte boven het aardoppervlak, dan zal hij ook




Fig. 50. Zonsondergang met vervormingen door luchtspiegeling volgens ‘geval 2’.

onder een kleine hoek naar beneden kunnen kijken; de invalshoek neemt nu weer af, van de richting WD af en verder is de invalshoek op de diskontinuïteitslaag weer voldoende klein en kan de gezichtsstraal weer ontsnappen. Binnen het gestippelde hoekje om de horizontale richting bereiken den waarnemer dus geen stralen van buiten de Aarde, hij ziet een ‘blinde strook’ van hoogte 2 h.

Van alle koorden door W is de horizontale koorde WC diè welke de kleinste hoek maakt met de cirkel. Bewijs: in driehoek MWB is,

$$\frac{\sin \widehat{WBM}}{WM} = \frac{\sin \widehat{MWB}}{MB}$$

, dus

$$\sin \widehat{WBM} = \frac{R}{R + H}$$

.

$$\sin(90° + h) = \frac{R}{R + H} \cos h$$

; men ziet dat $\widehat{WBM}$ het grootst is voor $h = 0$. - Bij de grens der totale reflektie is

$$\sin \widehat{WBM} =$$

$$= \frac{1}{n}$$

, wanneer $n$ de brekingsindex der ene laag t.o.v. de andere voorstelt; schrijf nog

$$\frac{H}{R} = \epsilon$$

, $n - 1 = \delta$, en benader cos $h$ door $1 - ½h^2$, dan komt er:

$$h = \pm \sqrt{\frac{2(\delta - \epsilon)}{n}}$$

of ongeveer

$$\pm \sqrt{2(\delta - \epsilon)}$$

, daar $n$ vrijwel 1 is.

Men ziet dat de blinde strook zich evenveel boven als onder de horizon uitstrekt (dubbel teken!). Voor H = 50 meter wordt □ = 78, $10^{-7}$; stel $\delta$ =

$100 \,.\, 10^{-7}$, dan wordt $h$ = ± 0,021 radialen = ± 7'; de blinde strook is 14' hoog.

Eigenlijk zouden we nog moeten rekening houden met de gewone aardse straalkromming, maar het was ons alleen om de hoofdtrekken van het verschijnsel te doen.

Men begrijpt nu dat bij zulk een struktuur van de dampkring

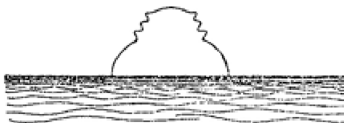


Fig. 51. Vervorming van de zon bij aanwezigheid van verscheiden diskontinuiteitslagen.

de Zon reeds boven de eigenlijke gezichteinder moet ondergaan, nml. zodra ze de blinde strook bereikt. Bevindt zich de waarnemer op een heuveltje, of op het dak van een schip, dan zal hij waarschijnlijk de onderrand van de Zon van achter de blinde strook te voorschijn zien komen. Natuurlijk worden de beelden vervormd, nml. in vertikale richting *samengedrukt boven* de blinde strook, *uitgerekt eronder*.

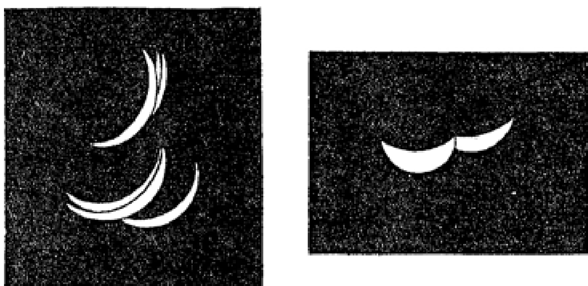


Fig. 52. Meervoudige Maansikkels.
Naar Onweders. enz. **21**, 51, 1900 en naar Reimann, Met. Zs. **4**, 144, 1887.

In sommige gevallen vertoont het zonsbeeld verscheiden trapjes: die wijzen blijkbaar op de aanwezigheid van meer dan één diskontinuïteitslaag (fig. 51). Soms snoert zich een dergelijke bocht nog dieper in, tot een strookje zich van de bovenkant der Zon losmaakt, even blijft hangen, samentrekt en verdwijnt, dikwijls met prachtige groene straal-verschijnselen; daarna kan zich weer een volgend strookje afsnoeren, enz. (fig. 58).

Dergelijke vervormingen als aan de Zon vindt men ook bij de Maan; aan de smalle Maansikkel zijn ze bijzonder duidelijk waar te nemen (fig. 52).

## 36. De groene straal.[1)]

*Hebt gij ooit de Zon zien ondergaan aan de horizon van de zee? - Ja zeker! - Hebt gij haar gevolgd, tot de bovenrand van haar schijf de gezichteinder net raakte en ging verdwijnen? - Zeer waarschijnlijk wel. - Maar hebt ge 't verschijnsel opgemerkt dat ontstaat op het ogenblik van de laatste zonnestraal, wanneer de lucht vrij van nevels is en volmaakt helder? - Wellicht niet. - Nu, de eerste maal dat de gelegenheid voor deze waarneming terugkomt (zij is zeer zelden), merk dan op dat het geen rode straal is die ge zult zien, maar een groene straal, wondermooi groen, van een groen dat geen schilder op zijn palet kan verkrijgen, een groen waarvan de natuur nergens meer de tint heeft nagebootst, noch in de tintverscheidenheid der planten, noch in de kleur der helderste zeeën! Is er groen in het Paradijs, dan kan het geen ander groen zijn dan dit, het ware groen der hoop!'*

*Jules Verne, Le Rayon Vert.*

*Volgens een oude Schotse legende zal degene die de groene straal ziet zich nooit meer 'in gevoelszaken' vergissen.*

De groene straal is niet zo zelden waar te nemen als men vroeger dacht; op één enkele reis van Indië naar Holland heb ik hem meer dan 10 maal waargenomen. De beste plaats om hem te zien is ongetwijfeld de zee, hetzij men van het dek van een schip of van het strand kijkt. Men kan hem echter ook waarnemen boven land, als de gezichteinder maar ver en scherp genoeg is. En hij komt soms ook voor als de Zon achter een scherp begrensde wolkenbank verdwijnt. Het schijnt, dat bergen en wolken niet hoger dan een graad of drie boven de gezichteinder mogen oprijzen. Er zijn enkele gevallen waarin de groene straal gezien is op verrassend korte afstand: Ricco deelt mee hoe hij zich eens aan de rand der schaduw plaatste van een niet ver verwijderde rots, en door het hoofd iets meer naar de ene of de andere zijde te bewegen de groene straal zo dikwijls als hij wilde kon zien[2)]; Whitnell zag hem aan de rand van een muur op 300 m afstand, en Nijland op een dergelijke wijze[3)], maar dit zijn grote uitzonderingen!

1) Mulder: The 'green ray' or 'green flash' (Den Haag, 1922). - Feenstra Kuiper: de Groene Straal (Diss. Utrecht, 1926). - In deze verhandelingen vindt men de zeer omvangrijke litteratuur over het onderwerp samengevat en bewerkt.
2) Mem. Spettr. Ital. **31**, 36, 1902.
3) Hemel en Dampkring, **33**, 219, 1935.

Alle waarnemers zijn het er over eens, dat de groene straal het duidelijkste optreedt als de Zon nog zeer helder blijft tot ze ondergaat, terwijl hij bijna onzichtbaar blijft als ze zich sterk rood kleurt.

Meestal helpt het gebruik van een toneel- of veldkijker, nog beter van een verrekijker; men ture echter nooit met de kijker in de Zon, tenzij in de laatste sekunden vóór de ondergang, op straffe van **gevaarlijke** verblinding! Ook met het ongewapende oog kijke men niet te vroeg in het laatste segment der zonneschijf, maar late zich door een helper waarschuwen, terwijl men zich eerst afwendt.

Het verschijnsel is zeer vluchtig, het duurt niet langer dan een paar sekunden. Door te Zandvoort de helling van de dijk op te rennen, die 6 meter hoog is, kon ik de groene straal 20 sekunden lang waarnemen; soms werd hij iets blauwer, soms iets witter, naarmate ik iets te langzaam of te snel holde. Evenzo moet het soms mogelijk zijn hem van de verschillende dekken van een schip achtereenvolgens te zien. Nijland zag hem verscheiden malen na elkaar tengevolge van de beweging van het schip. In een zeer bijzonder geval van abnormale straalkromming heeft men hem 10 sekunden en langer gezien.[1)] De Portugees Gago Continho kon de groene straal onbeperkt lang waarnemen aan het licht van een verre vuurtoren.

Tijdens de Zuidpool-expeditie van Byrd werd hij 35 minuten lang waargenomen, toen de Zon bij het einde van de lange poolnacht voor het eerst opging en zich precies langs de gezichteinder bewoog.

In drie verschillende vormen kan het verschijnsel zich vertonen:

1. *De groene rand*, die met een kijker eigenlijk altijd aan de bovenkant van de zonneschijf te onderscheiden is, en die breder wordt naarmate ze naar de gezichteinder daalt; terzelfdertijd kleurt de onderrand zich rood.
2. *Het groene segment* (fig. 53). Het laatste segment kleurt zich groen aan de uiteinden,



Fig. 53. Het groene segment.

en de groene kleur schuift geleidelijk naar het midden van het segment toe. Dit groene segment is met het blote oog zichtbaar, dikwijls gedurende een paar sekunden; met een veldkijker duurt het soms 4 tot 5 sec.

1) Onweders, enz. **48**, 81, 1927. - Feenstra Kuiper, t.a.pl.

3. *De eigenlijke groene straal.* (fig. 54) Dit verschijnsel, met het blote oog waarneembaar,

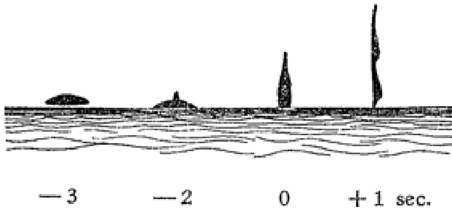


Fig. 54. De echte groene straal. De tijden zijn gerekend van het ogenblik van de zonsondergang. Naar D.P. Lagaaij.

is uitermate zeldzaam. Het is een groen straaltje of vlammetje, dat juist bij het verdwijnen der Zon uit de gezichteinder opschiet.

Bij alle drie vormen is de kleur zelden geel[1)], meest smaragdgroen, soms meer blauw of zelfs violet. Een waarnemer zag de kleur

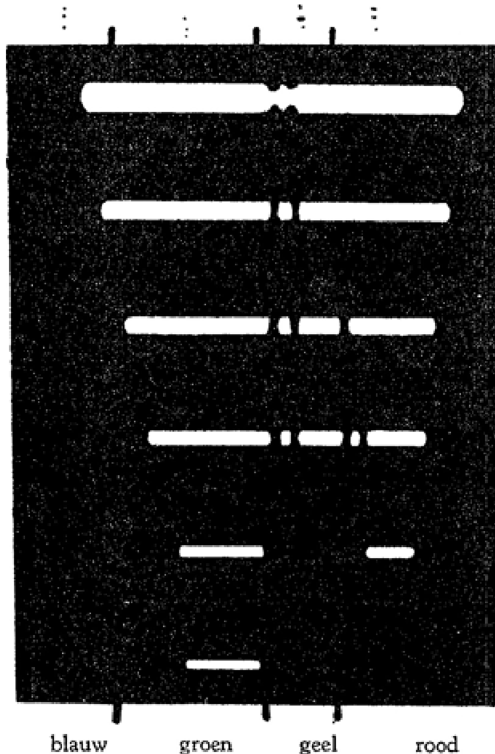


Fig. 55. Spektrum van de ondergaande zon.

verlopen van groen over blauw naar violet, in de loop van de paar sekunden die het verschijnsel duurde.

Aan de verklaring van de groene straal kan thans geen twijfel meer bestaan. De Zon staat laag, haar witte stralen hebben dus een zeer lange weg door de dampkring af te leggen. Van haar gele en oranje licht wordt een groot gedeelte opgeslorpt door de waterdamp, die in dit spektraalgebied banden heeft; haar violette licht wordt sterk verzwakt door de verstrooiing(vgl.

1) Hemel en Dampkring, **19**, 83, 1921. - N. Dijkwel, Hemel en Dampkring, **34**, 261, 1936.

§ 172): er moet dus vooral *rood* en *groen-blauw* overblijven, hetgeen ook door rechtstreekse waarneming is aangetoond.[1] (fig. 55). Nu is de dampkring onder dichter dan boven, zodat de lichtstralen op hun lange weg door de lucht

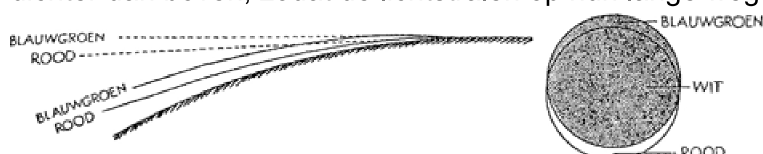



Fig. 56. Het ontstaan van de groene straal.

gekromd worden (vgl. § 29); en die kromming is iets geringer voor rood licht, iets sterker voor de sterker breekbare blauwgroene stralen. Daardoor ziet men nu als 't ware twee elkaar ten dele overdekkende zonneschijven, de blauwgroene iets hoger, de rode iets lager; zo ontstaat de rode rand onder, de groene rand boven. Men begrijpt nu onmiddellijk, dat bij zeer lage Zon de punten van het segment groen zijn, en dat het rood geleidelijk achter de gezichteinder verdwijnt terwijl het groen het gehele overblijvende segment overdekt.

In vele omstandigheden is echter de straalbreking bij de gezichteinder abnormaal sterk, en kan het groene segment duidelijker en langer zichtbaar zijn. Ontstaan er echte luchtspiegelingen, dan kan het zelfs uitgerekt worden tot een soort vlam of straal.

Deze opvatting zou gesteund worden



Fig. 57. Het laatste segment vertoont opwaarts gebogen hoeken. Er is kans op het optreden van de groene straal!

indien het bleek, dat het groene segment en de groene straal ontbreken wanneer de zee warmer is dan de lucht, zodat het dichtheidsverval en de straalkromming bijzonder gering zijn. Daar zijn inderdaad aanwijzingen voor.[2]

Ook beweert men dat het groene segment bijzonder mooi zichtbaar is, als aan de onderkant de kenmerken der luchtspiegeling aanwezig zijn: geen rechte begrenzing maar opwaarts gebogen hoeken.[3]

1) Naar Dijkwel, t.a.p. Bij zeer sterke verstrooiing verdwijnt ook het groenblauw: vandaar dat de groene straal onzichtbaar wordt wanneer de zon dieprood is bij het ondergaan.
2) R.W. Wood, Nat. **121**, 501, 1928.
3) Nat **111**, 13, 1923.

En als de zonneschijf trapvormig vervormd is door diskontinuïteitslagen, ziet men hoe zich af en toe aan de bovenkant een strookje afsnoert en onder duidelijke groenkleuring verdwijnt - een zeer merkwaardig schouwspel (fig. 58; vgl. fig. 51 § 35)! Ander feit dat voor de grote invloed der abnormale straalbreking pleit: in een bepaald geval kon de groene straal *wel*

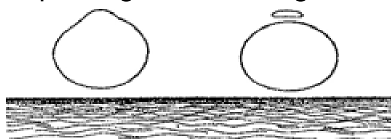


Fig. 58. Het ontstaan van de groene straal bij afsnoering van de bovenste delen der ondergaande zon.

waargenomen worden van op het ene dek van een mailboot, en *niet* van op het andere; de hoogte van de waarnemer kwam er dus op aan.[1] - Toch zijn er anderzijds goede natuuronderzoekers die volhouden dat de *gewone* aardse straalbreking al voldoende is.[2]

Dit dus is het voornaamste probleem betreffende de groene straal dat nog opgelost moet worden: *hoe sterk moet de straalbreking zijn om een gegeven graad van het optische verschijnsel te doen ontstaan?* Om dit op te lossen zou het voldoende zijn dat iemand aan ons strand op een aantal dagen nauwkeurig bepaalt hoe laat de Zon ondergaat, en terzelfdertijd op groene straalverschijnselen let. Het onderscheid tussen de waargenomen en de berekende tijd is een goede aanwijzing voor de afwijking der straalbreking van de normale waarde (vgl. § 29).

Vroeger heeft men nog wel gedacht dat de groene straal een physiologisch nabeeld zou zijn, complementair van kleur t.o.v. het laatste puntje der rode Zon[3] (§ 88). Deze onderstelling wordt afdoende weerlegd door het feit dat de groene straal ook bij zons**opgang** waargenomen wordt, al is het dan iets moeilijker, te weten waar men kijken moet om het eerste, 'straks' verschijnende licht onmiddellijk waar te kunnen nemen; men zoekt het helderste punt, of behelpt zich met de schemerstralen of met de bundels van Haidinger (§ 191 en 182). Nog een ander argument: de groene straal is alleen te zien, als de afstand van de gezicht-

1) S.W. Visser en J.Th. Verstelle, Hemel en Dampkring, **32**, 81, 1934. Deze waarneming verdient herhaald te worden, maar liefst door een zelfde waarnemer, die achtereenvolgens de verschillende dekken bestijgt (vgl. blz. 57).
2) Proc. R. Soc. **126**, 311, 1930. Noch Visser en Verstelle, noch Dijkwel vinden duidelijke correlatie tussen groene straal en aardse straalkromming.
3) Thans nog verdedigd door P. Moureau, La Nature, 294, 1929 (met interessante physiologisch-optische proeven).

einder voldoende groot is; dit zou op het nabeeld geen invloed hebben, maar is natuurlijk van groot belang voor de straalkromming. Met veel moeite is het gelukt de groene straal in kleuren te fotograferen op een autochroomplaat.[1)]

De groene straal is een enkele maal ook waargenomen aan de Maan en aan Venus. Een waarnemer beschrijft, hoe hij het spiegelbeeld van Venus zag opstijgen, de planeet tegemoet komend, en hoe de kleur ineens van dofrood in groen omsloeg toen ze elkaar ontmoetten.[2)]

> *Terras op duin, wijd zicht over Noordzee. Water hard blauw, onbewolkt, geen waas, geen damp, kim strak scherp ...*
> *Witte gordijnen toonen licht blauw, alle schaduwen vallen op door bijzonder blauwe kleur.*
> *Zon, groote gepoetst koperen schijf, straalt in goudlichtende lucht, zakt als een vuurkogel in de zee*; *visscher passeert, vliegt niet in brand. Zon blijft koper, nu bijna weg, een stip, helder blauwgroene vlam als een juweel in gouden omgeving op donkerblauwe zee, groene straal is voorbij.*
> *J.P.F. van der Mieden van Opmeer,*
> *Hemel en Dampkring*, **30**, *234, 1932*.

## 37. De groene branding.[3)]

Aan de kust van Sumatra is waargenomen, dat de schuimende golven der branding aan de verre gezichteinder **groen** leken; dit gold alleen voor de lage golven, de hoge waren gewoon wit. De zee was grauw en er was sterke kimduiking.

Dit verschijnsel lijkt wel identiek met de groene straal: de schitterende lage golven komen overeen met het uiterste randje der ondergaande Zon.

## 38. De rode straal.[4)]

Uit de verklaring van de groene straal volgt dat er ook een rode straal moet zijn, die bijvoorbeeld zou moeten optreden als de

1) Kerolyr, La Nature, 100, 1931 (II).
2) Waarneming van de groene straal aan Jupiter: zie Hemel en Dampkring, **31**, 448, 1933.
3) S.W. Visser, Hemel en Dampkring, 19, 83, 1921.
4) Nat. 94, 61, 1914. De waarneming van de rode straal als de onderrand der zon net opgaat (boven de Alpen) schijnt mij zo moeilijk, dat ik de mededeling in Ann. soc. mét. France 47, 1899 in twijfel moet trekken.
Een alleraardigste waarneming van de rode straal met een toneelkijkertje, bij het ondergaan van grote zonnevlekken: zie W.M. Lindley, J.B.A.A. 47, 298, 1937.

Zon achter een zware, scherp begrensde wolkenbank nabij de gezichteinder is gedaald, en haar eerste puntje onder die wolkenbank te voorschijn komt. Dit verschijnsel is inderdaad waargenomen, maar zeer zelden; het schijnt nog korter van duur dan de groene straal te zijn.

Whitnell, die de groene straal aan een opening in een muur op 300 m afstand waarnam, zag bij diezelfde gelegenheid ook de rode straal.

## 39. Het fonkelen van aardse lichtbronnen.[1)]

Het verschijnsel van het fonkelen ziet men in zijn sterkste ontwikkeling boven de komforen, zoals men ze in onze steden dikwijls ziet gebruiken om asfalt voor het wegdek te smelten. De verre voorwerpen zijn dan bijna niet te herkennen, ze schijnen te dwarrelen, te golven; het lijkt wel of de lucht ondoorzichtig geworden was! Maar ook als men over een lokomotiefketel kijkt, over een plaatijzeren afdak dat door de zon beschenen wordt, ziet men alles in de verte onregelmatig trillen; een stoppelveld, een zandvlakte door de zon verhit zijn al voldoende om het effekt teweeg te brengen.

Het zijn vooral de heldere, glanzende voorwerpen waaraan men het fonkelverschijnsel duidelijk ziet: berkestammen, witte palen, vlekken witte zandgrond, tuinbollen, koperen kerktorenbollen, of verre ramen waar de Zon in schijnt. 's Zomers of op een zonnige, koude lentedag ziet men de fonkeling van de glimmende spoorrails in de verte: de lijn blijft niet recht, ze kromt in slangelijntjes heen en weer. Legt men het hoofd tegen de grond, dan is de fonkeling veel sterker, men ziet ‘luchtslieren’ die door de wind meegevoerd worden; deze ‘golven’ kunnen hoger dan watergolven zijn. Door een kijkertje ziet men de verre voorwerpen eigenlijk nooit scherp wanneer de zon schijnt (kijk vooral in de richting van de zon af). Een geoefend oog kan 's winters door de trilling der beelden van verre voorwerpen de warme lucht boven de daken der huizen zien opstijgen (Oudemans).

‘Want de lucht door welke wij de sterren zien is voortdurend in roering; zoals men zien kan aan *de trillende beweging van schaduwen door hoge torens geworpen*, en aan de flikkering der vaste sterren.’ (Newton, Opticks, 3e uitg. blz. 98). - Wie heeft dit wel eens waargenomen?

Al deze verschijnselen zijn te verklaren door de Kromming

1) Met. Zs. 9, 138, 1892.

der lichtstralen in de warme luchtstroompjes, die als fonteintjes van de verhitte aarde opstijgen; reeds op een of twee meter hoogte hebben ze zich in belangrijke mate met de koude lucht vermengd en zijn de slieren minder geworden. Het is duidelijk dat de fonkeling des te sterker zal zijn, naarmate we over een groter afstand door de onregelmatig warme luchtlaag kijken: lichten die enige kilometer ver verwijderd zijn fonkelen in de avond; naarmate men dichterbij komt wordt de flikkering geleidelijk minder en verdwijnt. - Een automobiel die aan de kant van de weg staat, weerspiegelt de zon in felle lichtschittering: van een afstand van 500 meter is het één en al gefonkel, op 200 meter is het licht al veel rustiger, en als ik nog iets dichterbij ben gefietst, is het fonkelen geheel verdwenen.

Men heeft opgemerkt, dat de delen van de lichtweg die het dichtst bij ons oog zijn ook het meest tot de fonkeling bijdragen. En inderdaad: een brilleglas dat u op dit boek legt vergroot of verkleint de letters niet; hoe dichter het echter bij ons oog gehouden wordt, hoe meer het de beelden wijzigt. Als een dichte wolk gedurende korte tijd de zonnestraling komt onderscheppen, zodat de lichtweg althans in het dichtst bij ons gelegen gedeelte beschaduwd is, ziet men de fonkeling bijna onmiddellijk ophouden; omgekeerd verschijnt zij weer zodra de wolk wegtrekt. De oppervlakte-temperatuur van de grond schijnt dus wel *heel* snel te volgen als de bestraling verandert.

Merkwaardigerwijze ziet men het fonkelen niet alleen boven zand of aarde of huizen, maar ook boven een wateroppervlak, boven sneeuw, boven het gebladerte van het woud, waarvan we dus wel moeten aannemen dat ze door bestraling temperaturen kunnen krijgen welke sterk van die der lucht afwijken. De rijen straatlantarens langs het strand, in de verte, leveren een wondermooi schouwspel op als men ze gadeslaat van op een schip dat de haven komt binnenvaren, of dat stoomt door het Kanaal, door de Straat van Messina ....

Wie het fonkelen dikwijls op dezelfde plaats kan waarnemen, krijgt weldra een goed denkbeeld van zijn grotere of geringere sterkte. Bij zonnig weer is het altijd veel duidelijker dan bij bewolkte lucht; vóór zonsopgang is het vrij zwak, wordt al vrij gauw na zonsopgang sterk, bereikt een maximum rond middagtijd, en wordt weer veel minder uitgesproken tegen 16 of 17 uur. Op sommige dagen evenwel kan de ontwikkeling een heel andere zijn.

Aardse lichtbronnen vertonen soms kleurverschijnselen bij

het fonkelen, maar alleen wanneer ze zeer ver verwijderd zijn. In een uitzonderlijk geval zag men reeds duidelijke kleurwisselingen aan lantarens op slechts 5 km afstand.[1)]

## 40. Het fonkelen der sterren (= scintillatie).[2)]

*Het pinkoogt, of 't een meisken waar'*
*dat weenen wilt, van verre,*
*nu zuid, nu noord, nu hier, nu daar,*
*een' nieuwgeboren sterre.*

*G. Gezelle, Tijdkrans*
('*Het Zonnelicht is neergedaald*').

Let op het fonkelen van Sirius of een andere heldere ster dicht bij de gezichteinder. 1. Door de kijker bemerkt men kleine veranderingen van plaats. 2. met het ongewapende oog ziet u

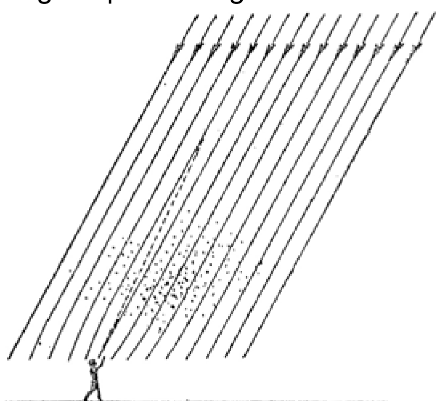


Fig. 59. Hoe ongelijkmatigheden in de dampkring de lichtstralen van een ster doen krommen en de fonkeling veroorzaken. Op dit ogenblik ziet de waarnemer de ster naar links verplaatst en versterkt.

veranderingen van helderheid, en 3. veranderingen van kleur.

Onnodig te zeggen dat dit flikkeren geen verschijnsel is dat op de ster zelf gebeurt; zijn verklaring is dezelfde als die van de fonkeling der aardse lichtbronnen. De plaatsveranderingen ontstaan door straalkromming in de slieren warme en koude lucht die altijd naast elkaar in de dampkring voorkomen, vooral ook waar een warme luchtlaag over een koude luchtlaag schuift en luchtgolven met wervelingen gevormd worden. (fig. 59) De veranderingen in helderheid ontstaan, doordat de onregelmatig afwijkende lichtstralen plaatselijk dichter, plaatselijk ijler ver-

1) Hemel en Dampkring, **30**, 130, 1932.
2) J. Houtgast, Hemel en Dampkring, 34, 169, 1936. Zie verder de uitvoerige behandeling in Pernter-Exner.

deeld zijn waar ze de aarde treffen (fig. 59); als dit gehele stelsel door de wind voortbewogen wordt (terwijl het zich ondertussen nog voortdurend wijzigt), bevindt zich dus de waarnemer nu eens in een gebied van grotere, dan eens in een gebied van kleinere helderheid. De kleurveranderingen zijn te wijten aan de geringe kleurschifting *van de gewone aardse straalkromming*, waardoor de stralen van de ster een ietwat andere weg doorlopen volgens hun kleur: voor een ster die 10° boven de horizon staat, berekent men dat de afstand tussen de violette en rode stralen reeds 28 cm is op 2000 m hoogte, 58 cm op 5000 m; de luchtslieren zijn gemiddeld tamelijk klein, het zal dus dikwijls voorkomen dat de violette straal

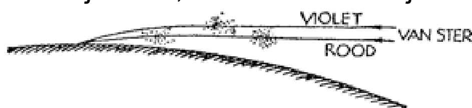



Fig. 60. Het ontstaan der kleuren bij het fonkelen der sterren.

door een slier gaat en afwijkt, terwijl de rode niet onderschept wordt: de ogenblikken waarop de ster helderder of zwakker wordt door de fonkeling, vallen dus voor de verschillende kleuren niet samen.

De fonkeling is het geringst bij het zenith: bij gemiddeld rustige lucht ziet men daar nu en dan de heldere sterren nog net merkbaar even flikkeren. Naarmate de sterren dichter bij de gezichteinder staan fonkelen ze meer, eenvoudig omdat we dan door een dikkere luchtlaag, dus door meer slieren kijken (fig. 60). Kleurverschijnselen schijnen boven 50° hoogte nooit op te treden, onder 35° veelvuldig. Het allerprachtigst fonkelt de heldere ster Sirius, die gedurende de wintermaanden zichtbaar is, en vrij laag staat.

Het fonkelen gaat zo snel, dat wij niet goed kunnen zien wat er eigenlijk gebeurt. Wie echter bijziende is en een lorgnet draagt, kan de fonkeling prachtig bestuderen door zijn lorgnet in de hand te nemen, vóór zijn oog te houden, en het een weinig heen en weer te schommelen in zijn eigen vlak. Het beeld van de ster wordt aldus tot een lichtlijntje uitgetrokken; liefst zet men de beweging om in een cirkelbeweging, die men gemakkelijk regelmatig leert uitvoeren (3 tot 4 rondgangen per sekunde). Tengevolge van het voortduren der gezichtsindrukken (§ 80) ziet men nu langs de cirkelomtrek uitgespreid al de helderheidsen kleurwisselingen die de ster achtereenvolgens vertoont: een prachtig schouwspel als de scintillatie sterk is! Soms komen volmaakt donkere plekken in de lichtband voor: er zijn dus

ogenblikken waarop we haast geen licht van de ster krijgen. Men kan schatten hoeveel verschillende kleuren op de cirkelomtrek te zien zijn, en daaruit het aantal kleurwisselingen per sekunde berekenen. - Deze waarnemingsmethode berust op het feit, dat een brilleglas vóór ons oog niet alleen als lens werkt, maar ook als een zwak prisma zodra we niet door het centrum kijken.

Andere methodes om het fonkelverschijnsel te ontleden[1]: 1. wie een normaal oog heeft, kan een zwak hol brilleglas op de aangegeven wijze gebruiken, maar moet daarbij akkomoderen, alsof de ster dichter bij ons was; 2. kijk door een toneelkijkertje, en geef daar kleine stootjes aan; 3. bekijk de ster in een spiegeltje waaraan u kleine draaiingen geeft; 4. beweeg eenvoudig uw blikrichting over de ster (dit lukt alleen met veel oefening! Vgl. § 82).

Er is een eenvoudige waarneming, waarmee men rechtstreeks een schatting kan krijgen van de afmetingen der luchtslieren.[2] Kijk naar een sterk fonkelende ster *met gekruiste oogassen*, dus richt uw ogen naar een voorwerp op 1,5 m afstand bijvoorbeeld, dat zich ongeveer in de richting van de ster bevindt. U ziet nu niet één, maar twee beeldjes van de ster, en *die twee beeldjes scintilleren niet gelijktijdig*, omdat de ogen al zover vaneen staan, dat een slier die vóór het éne oog komt nog geen invloed heeft op het andere. Een groot gedeelte der luchtslieren is dus kleiner dan 7 cm, de oogafstand.

Zeer fraai is het scintilleren van het Zevengesternte (de Plejaden), waarvan de sterren zo dicht bijeen zitten, dat men aan de samenhang in het gefonkel het voorbijtrekken der afzonderlijke luchtslieren kan herkennen.

## 41. Hoe meet ik het fonkelen der sterren?

1. Als men niet weet hoe een verschijnsel te meten, kan men altijd beginnen met een willekeurige, qualitatieve schaal ervoor op te stellen: voor een ster die *niet* fonkelt gebruik ik het cijfer 0; de sterkste fonkeling die ik ooit nabij de gezichteinder heb gezien noem ik 10; daartussen onderscheid ik de overgangen door de andere cijfers. Het is merkwaardig, hoeveel nut dergelijke voorlopige schalen in alle natuurwetenschappen hebben gehad; sneller dan men het verwachten zou, went men aan de betekenis van elk nummer der schaal; en er komt weldra een ogenblik,

1) Phil. Mag. **13**, 301, 1857.
2) R.W. Wood, Physical Optics (blz. 76; New York, 1905). - Voor deze belangwekkende proef is dus geen enkel hulpmiddel nodig, alleen: oefening in het beheersen der ogen!

waarop iemand een middel vindt om de qualitatieve schaal in getalmaat te ijken.
2. Een andere eenvoudige maatstaf voor de luchtonrust is de hoogte boven de horizon waarop de kleuren verdwijnen; of de hoogte waarop de fonkeling praktisch onmerkbaar wordt.
3. Het aantal lichtwisselingen per sekunde, bepaald met het draaiende lorgnetglas, geeft eveneens een ruw kenmerk van het karakter der fonkeling (vgl. § 40).

## 42. Wanneer fonkelen de sterren het sterkst?[1)]

Het sterke fonkelen bewijst eigenlijk slechts dit: dat de dampkring niet homogeen is, dat ongelijke lagen dooreengeroerd worden. Doordat echter zulk een dampkring meestal bij bepaalde weertoestanden voorkomt, lijkt het alsof het fonkelen het gevolg was van dat bijzondere weer.

Het fonkelen neemt gemiddeld toe bij lage barometerdruk, lage temperatuur, grote vochtigheid, sterke kromming der isobaren, groot drukverval per Km; bij gemiddeld krachtige wind is het sterker dan bij zwakke of zeer krachtige wind. Het is dus duidelijk dat de grotere of geringere rust in de dampkring van zoveel ingewikkelde faktoren afhangt, dat het fonkelen der sterren voorlopig niet gebruikt kan worden voor de weervoorspelling.

Belangwekkend is, dat het fonkelen sterker wordt *in de nabijheid van wolken:* een bewijs dat daar lagen van verschillende temperatuur naast elkaar voorkomen.

Men beweert dat het ook toeneemt *in de schemering*, wat òf een physiologische gezichtsbegoocheling moet zijn, òf het gevolg van de bijzondere atmosferische toestanden omstreeks dat uur. Zelfs wordt gezegd dat *Noorderlicht* het fonkelen bevordert, maar dat is moeilijk te begrijpen, aangezien het noorderlicht zich zó hoog in de dampkring vormt (100 km!).

Het fonkelen is het sterkst aan de noordkant van de hemel, wat door iets ingewikkelder beschouwingen begrijpelijk gemaakt kan worden.

## 43. Het fonkelen der planeten.

Planeten fonkelen veel minder dan sterren. Dit lijkt zo verwonderlijk, omdat zij er overigens voor het ongewapende oog net

1) Dufour, Phil. Mag. **19**, 216, 1860. - Arch. sc. phys. nat. **29**, 545, 1893. - Bigourdan, C.R. **160**, 579 en verder, 1915. - J.N. Dörr, Met. Zs. **32**, 153, 1915. - En vele anderen.

eender uitzien. De oorzaak van het verschil is daarin gelegen, dat de sterren ons een schijfje vertonen dat tengevolge van de ontzaglijke afstand zelfs voor de sterkste kijkers puntvormig schijnt (ten hoogste 0",05), terwijl de planeten een schijnbare middellijn vertonen van 10" tot 68" (Venus), 31" tot 51" (Jupiter). Door een vlakje AB op grote hoogte in de dampkring gaat dus in 't geval van de planeten een kegeltje van lichtstralen, waarvan sommige ons oog treffen; een luchtslier die, naar we weten, slechts een afwijking van enkele boogsekunden aan de lichtstralen geeft, zal dus voor gevolg hebben dat de stralen die eerst ons oog troffen nu vervangen worden door andere stralen van dezelfde kegel, hetgeen niets aan de intensiteit verandert. Alleen in 't geval van een bundel, die ons oog net niet bereikte, en die er nu wellicht in valt, bemerken we een helderheidsverandering; maar het resultaat daarvan zal gering zijn, omdat er veel slieren zijn, en dat sommige de stralen naar ons oog toe buigen, andere van ons oog af. In 't geval van Jupiter bijvoorbeeld, op $30^{o}$ boven de gezichteinder, heeft de bundel van ons oog naar de planeet op 2000 m al een doorsnee van 60 tot 100 cm.

We begrijpen nu, dat de fonkeling der planeten merkbaar zal worden zodra de richtingverandering die de stralen ondergaan van dezelfde orde is als de schijnbare middellijn der planeet.

Vandaar dat de fonkeling van Venus en Mercurius, die op bepaalde tijden als vrij smalle sikkels worden gezien, soms zeer merkbaar worden kan, ja, zelfs met kleurwisselingen gepaard gaat als Venus vlak bij de kim staat. Op dagen van sterke luchtonrust en als de planeten laag staan, kan men haast altijd enkele intensiteitswisselingen waarnemen.

Zo geeft ons dus de scintillatie een schatting van de grootte van lichtpuntjes, waaraan we met ons ongewapend oog geen spoor van een schijfje meer kunnen waarnemen! Men heeft zelfs beweerd, op die wijze de middellijn der vaste sterren te kunnen schatten, maar dit schijnt voorlopig nog te optimistisch.[1)]

## 44. Schaduwbanden.[2)]

Het fonkelen der sterren ontstaat dus door de onregelmatige dichtheidsschommelingen in de luchtoceaan, over wiens bodem

1) Het is niet goed begrijpelijk, waarom rode sterren meer fonkelen dan witte (Arc. sc. phys. nat. **29**, 545, 1893).
2) Cl. Rozet, C.R. **142**, 913, 1906; **146**, 325, 1906.

wij aardbewoners ons voortbewegen. Het is eigenlijk hetzelfde verschijnsel als het plaatselijk verzamelen en uitspreiden van de zonnestralen door zacht golvend water (§ 23): de vissen zien de zon fonkelen zoals wij de sterren (fig. 30). Er is slechts het verschil, dat de schommelingen in *dikte* der waterlaag vervangen zijn door schommelingen in *dichtheid* van de lucht; deze laatste zijn zoveel minder werkzaam, dat we de fonkeling alleen bij de allerscherpste puntvormige lichtbronnen kunnen waarnemen.

Zoals we de lichtverzamelingen in helder water hebben vertoond, kunnen we nu ook de luchtslieren rechtstreeks zichtbaar maken!

's Nachts, in een kamer die goed donker is, en waarvan slechts een klein raam wordt opengezet door hetwelk het licht van Venus binnenvalt, kan men op een effen muur of op een blad wit karton ijle wolkerigheden zien voorbijtrekken: ‘schaduwbanden’. Het verschijnsel is alleen duidelijk wanneer de planeet laag bij de gezichteinder staat; telkens als ze even helderder opflikkert, ziet men op het scherm een helderder band voorbijtrekken, en omgekeerd past een helderheidsafneming bij een donkerder band (vgl. fig. 59). Wat de ene waarneming ons ‘subjektief’ laat zien, vertoont de andere ‘objektief’. Deze luchtslieren hebben geen vaste voorkeursrichting, ze bewegen mee met de wind die toevallig heerst in de luchtlaag waar ze ontstaan.

Jupiter, Mars, Sirius, Betelgeuze, Procyon, Capella, Wega, Arcturus kunnen eveneens tot dergelijke waarnemingen aanleiding geven, zij het ook moeilijker wegens de geringere lichtsterkte. Veel mooier ziet men de luchtslieren, als toevallig een ver verwijderd zoeklicht een muur verlicht bij de plaats waar men zich bevindt; de afstand moet bv. 25 Km zijn.[1)]

Merkwaardig zijn de schaduwbanden die bij een volledige zonsverduistering kort vóór en kort na de totaliteit te zien zijn op een witte muur of op een uitgespreid wit laken.[2)] Ze doen denken aan de plooien van een reusachtig gordijn. Het zijn ook luchtslieren die we nu zien, maar zichtbaar gemaakt in het licht ener lijnvormige lichtbron: de laatste sikkel der nog niet geheel verduisterde Zon. De verschijnselen worden daardoor iets ingewikkelder dan bij een puntvormige lichtbron, ieder punt wordt tot een boogje uitgetrokken (§ 1 en 3), en de wolkerige

1) Nat. **37**, 224, 1888.
2) S.A. Mitchell, Handb. der Astrophysik, IV, 353, 1929.

slieren schijnen nu te bestaan uit banden, alle evenwijdig aan het zonnesikkeltje (in zijn helderste punt). De wind doet die banden bewegen, maar we zien alleen de komponente loodrecht op hun eigen richting. Soms duurt het verschijnsel maar enkele sekunden, meestal wel een minuut of meer. De afstanden der banden geven ons een denkbeeld van de gemiddelde grootte der luchtslieren: men vindt meestal 10-40 cm opgegeven.

Om deze schaduwbanden te zien, behoeven we niet te wachten op de zó zeldzame volledige zonsverduisteringen. Bij zonsopof ondergang zijn dergelijke waarnemingen te doen, gedurende de korte ogenblikken dat slechts een smal segmentje van de Zon boven de gezichteinder uitsteekt. In dit geval zijn de banden horizontaal, en bewegen naar boven of naar beneden volgens de windrichting. Hun snelheid is 1-8 m sec. volgens de windsterkte, hun tussenruimten bedragen 3-20 cm. Meestal zijn ze slechts zichtbaar gedurende 3 tot 4 sekunden, omdat weldra de zonnesikkel te breed wordt.

# Het meten van lichtsterkte en helderheid.

## 45. De sterren als lichtbronnen van bekende sterkte.

De sterren vormen een natuurlijke reeks lichtbronnen van allerlei lichtsterkten. Met fotometers zijn deze zeer nauwkeurig gemeten en in *grootteklassen* uitgedrukt; de 'grootteklasse' *m* heeft dus niets te maken met de 'grootte' van de ster, maar alleen met haar lichtsterkte *i*.

| ***m* = grootteklasse** | ***i* = lichtsterkte in willekeurige maat** | ***m*** | ***i*** |
|---|---|---|---|
| -1 | 251 | | |
| 0 | 100 | 0 | 100 |
| 1 | 39,8 | 0,1 | 91 |
| 2 | 15,8 | 0,2 | 83 |
| 3 | 6,31 | 0,3 | 76 |
| 4 | 2,51 | 0,4 | 69 |
| 5 | 1,00 | 0,5 | 63 |
| 6 | 0,40 | 0,6 | 58 |
| 7 | 0,16 | 0,7 | 53 |
| | | 0,8 | 48 |
| | | 0,9 | 44 |

Elke klasse is 2,51 maal zwakker dan de vorige. Op een constante na is $i = 10^{0,4\,m}$.

In fig. 61 staan de grootteklassen aangegeven voor de sterren in de omgeving van de Grote Beer, die het gehele jaar te zien zijn. In fig. 62 staan de grootteklassen voor het schitterende wintersterrebeeld Orion. Ziehier nog enkele opgaven voor zeer bekende heldere sterren:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sirius | = *α* Grote Hond | -1,3 | Altaïr | = *α* Arend | 1,1 |
| Wega | = *α* Lier | 0,3 | Aldebaran | = *α* Stier | 1,1 |
| Capella | = *α* Voerman | 0,3 | Pollux | = *β* Tweelingen | 1,3 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Arcturus | = α Bootes | 0,2 | Regulus | = α Leeuw | 1,6 |
| Procyon | = α Kleine Hond | 0,6 | Castor | = α Tweelingen | 1,7 |

Voor andere sterren raadplege men een atlas, bv. Schurig-Götz, Tabulae Celestes.
De meeste mensen kunnen nog de 6e grootteklasse waarnemen, althans bij heldere nachten en ver van het licht der steden.

Fig. 61.

## 46. Uitdoving van het licht door de dampkring.

Nabij de gezichteinder zien we gewoonlijk maar zeer weinig sterren. Dat komt doordat de lichtstralen verzwakt worden bij hun weg door de lucht; stralen die bijna horizontaal verliepen hebben een veel langere weg afgelegd dan schuin invallende stralen, en worden dus sterker verzwakt.
Die verzwakking gaan we bepalen, zo mogelijk met behulp van een sterre-atlas, aangevuld met een lijst van grootteklassen; maar onze tabelletjes van § 45 zijn eigenlijk al voldoende, als Orion laag, en de Grote Beer hoog staan. De daar opgegeven

Fig. 62.

grootteklassen gelden voor 't geval dat de sterren hoog aan de hemel staan. Nu zoeken we een ster A, die niet ver van de gezichteinder staat, en vergelijken haar helderheid met die van de sterren om het Zenith (sterren hoger dan 45°, die bijna niet verzwakt zijn). Zoveel mogelijk zoeken we sterren die precies gelijk zijn aan A of waar A tussenin ligt. Het verschil tussen de *schijnbare* grootteklasse van A en de *ware* grootteklasse volgens de tabellen, wordt opgetekend en bv. Δ genoemd; we bepalen ook nog de hoogte van de ster A op dit ogenblik (§ 235).

Als wij dit voor verschillende sterren op allerlei afstanden *h* boven de kim uitvoeren (een 10-tal is al voldoende om een eerste indruk te krijgen), komt er een tabelletje dat min of meer gelijken zal op het volgende:

| *h* | **Δ** | **Z** | **sec Z** |
|---|---|---|---|
| 90° | 0 | 0° | 1 |
| 45° | 0,09 | 45° | 1,41 |
| 30° | 0,23 | 60° | 2,00 |
| 20° | 0,45 | 70° | 2,92 |
| 10° | 0,98 | 80° | 5,73 |
| 5° | 1,67 | 85° | 11,4 |
| 2° | 3,10 | 88° | |

Deze getallen der tweede kolom zijn gemiddelde waarden voor onze gewesten en voor zeer heldere lucht, maar ze veranderen van plaats tot plaats en vooral van nacht tot nacht.

In het tabelletje staat ook

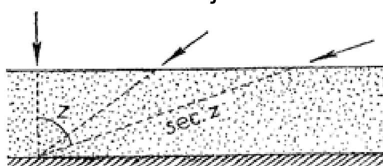


Fig. 63. Hoe schuiner de lichtstraal, hoe langer zijn weg door de dampkring.

de zenithsafstand Z = 90° - h opgetekend, en sec Z, die aangeeft hoe lang de weg is die het licht door de dampkring heeft afgelegd (fig. 63). Zet nu uit: Δ tegen sec Z, dan vindt u een lijn die niet teveel van een rechte afwijkt; trek zo goed mogelijk tussen de waargenomen punten (fig. 64)! We zien dus uit deze tekening hoeveel grootteklassen de ster zwakker wordt naarmate de weg door de dampkring toeneemt. Het buitengewoon interessante van deze figuur is, dat men door de lijn te verlengen

vinden kan hoeveel sterker de sterren zouden lijken als wij boven de luchtlaag die de Aarde omgeeft konden stijgen, nog hoger dan de stratosfeer! Een ster nabij het zenith zou 0,2 grootteklassen helderder worden, dit is ongeveer van 80 tot 100.

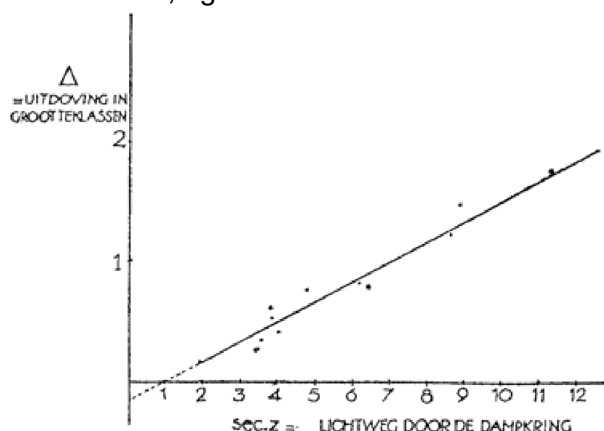



Fig. 64. Uitdoving Δ van het licht ener ster door de dampkring, bij verschillende zenithsafstand *z*.

We hebben dus bevonden dat de dampkring voor steil invallende stralen bijna ⅕ van het licht uitdooft; en dit geldt zowel voor de zon als voor de sterren. Die uitdoving is geen absorptie van het licht, maar *verstrooiing*, dezelfde verstrooiing waardoor de lucht blauw is (vgl. § 172).

### 47. Vergelijk een ster met een kaars.

Op een terrein met uitgestrekt, vrij uitzicht, bij nacht, vergelijken we de lichtsterkte van een kaars met die van een heldere ster, bv. Capella. Het is verrassend, hoe héél ver we ons van de kaars moeten verwijderen, wil haar helderheid afgenomen zijn tot die van de ster: op ongeveer 900 m is er gelijkheid. We krijgen dus van Capella een verlichtingssterkte van $1 / (900)^2$ = 1/810.000 lux (vroeger: ‘meterkaars’).

De proef kan ook genomen worden met een zaklantaarn, maar dan zijn nog groter afstanden nodig. Stel het lampje boven op het dak van een huis of voor een torenraam!

Let op het kleurverschil!

## 48. Vergelijk twee straatlantarens met elkaar.

Bij een avondwandeling merken we op dat we nu en dan *twee* schaduwen hebben, telkens nml. als we ons tussen twee lantarens bevinden. Naarmate we dichter bij de ene of bij de andere komen, wordt de ene of de andere schaduw zwarter. Waar de twee schaduwen even sterk zijn, krijgen we van beide lichtbronnen evenveel licht; uit de afstanden *a* en *b* volgt dan de verhouding der lichtsterkten: $A / B = a^2 / b^2$.

Bij vergelijking van gasgloeilicht met elektrische lampen is het verschil in kleur van de schaduwen opvallend.

## 49. Vergelijk de maan met een lantaren.

Zoek weer de twee schaduwen die deze lichtbronnen werpen: die tegenover de maan is roodachtig; die tegenover de lantaren, donkerblauw (vgl. § 96). We verwijderen ons van de lantaren: de maanschaduw blijft even sterk, maar de lantarenschaduw verbleekt; stel dat op 20 m van de lantaren beide gelijk zijn. De straatlantaren is een gewone, niet zeer sterke gloeilamp, ik schat: 50 kaars; op 20 m afstand is de verlichtingssterkte $50 / 20^2 = 0{,}13$ lux. Dit moet dus tevens de verlichtingssterkte zijn die de volle maan teweegbrengt.

Vorige proef dachten wij ons bij volle maan. Herhaal ze bij eerste of laatste kwartier: de verlichtingssterkte is nu *veel minder dan de helft;* een aanzienlijk deel van het maansoppervlak is verduisterd door de schuine schaduwen der maanbergen (vgl. § 168)

Juiste waarden: volle maan ............. 0,20 lux,
eerste en laatste kwartier .. 0,02 lux.

## 50. Helderheid van de maanschijf.

Toen Herschel zijn reis naar Zuid-Afrika ondernam en zijn schip te Kaapstad aankwam, zag hij de bijna volle maan opgaan boven de Tafelberg, die beschenen was door de ondergaande zon. Het trof hem, dat de maan minder helder leek dan de rotsen, en hij besloot hieruit dat de maanoppervlakte uit donkere gesteenten moet bestaan.

Een dergelijke waarneming kunnen we in onze eigen omgeving doen, als we omstreeks 6 u. 's avonds de opgaande volle maan met een witte muur vergelijken, die door de ondergaande zon beschenen wordt. De afstanden zon - maan en zon - aarde zijn praktisch gelijk; als maan en muur uit dezelfde stof bestonden,

zouden ze nu dezelfde helderheid moeten hebben, *ook al zijn hun afstanden tot het oog nog zo verschillend* (prachtige toepassing van een klassieke fotometrische stelling!). Het waargenomen verschil moet daaraan toe te schrijven zijn, dat de maan uit donkere gesteenten bestaat (lava?).

Wil deze waarneming zuiver zijn, dan moeten zon en maan even hoog boven de gezichteinder staan; hun licht wordt dan in dezelfde mate door de dampkring verzwakt.

## 51. Enkele helderheidsverhoudingen in het landschap.[1]

Helderheid zon = 300000 × helderheid van de blauwe lucht.

Helderheid van witte wolk = 10 × helderheid van de blauwe lucht.

Op een gewone zonnige dag met blauwe lucht komt 80% van het licht rechtstreeks van de zon, 20% van de hemel.

Verlichting op een horizontaal vlakje na zonsondergang, bij onbewolkte lucht[2];

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| stand der zon: | $-1^{\circ}$ | $-2^{\circ}$ | $-3^{\circ}$ | $-4^{\circ}$ | $-5^{\circ}$ | $-6^{\circ}$ | |
| | 250 | 113 | 40 | 13 | 5 | 2 | lux. |

Het oog past zich zo snel en goed aan alle verlichtingssterkten aan, dat wij ons geen voldoende rekenschap meer geven van de kolossale helderheidsverhoudingen die om ons heen voorkomen. Vergelijken wij eens een landschap verlicht door de volle zon, en een ander verlicht door de maan:

| | | | |
|---|---|---|---|
| de zonneschijf zelf | 100000 × 40000 | de maanschijf | 20000 |
| een helderwit voorwerp | 50000 | een helderwit voorw. | 0,25 |
| roetzwart | 1000 | roetzwart | 0,005 |

In éénzelfde landschap komen dus geen groter helderheidsverhoudingen voor dan ten hoogste 100:1; in absolute waarde verandert de verlichting echter ontzaglijk. Roetzwart in de zonneschijn is nog vierduizend maal helderder dan een wit papier bij volle maan!

## 52. Terugkaatsingsvermogen.

*Je ziel is een groot water,*
*de sterren vinden geen beeld in jou.*
*Kurt Heynicke*, '*Ferne Frau*' (*uit de bundel*:
*Rings fallen Sterne. Berlin*, 1920).

Heeft u ooit de sterren in het water teruggekaatst gezien? In de stad lukt dit meestal niet, buiten wel, mits men kijkt in

1) Nela Research Lab. 1917, blz. 239 en 245. - Postma, Daylight measurements in Utrecht (Diss. 1936).
2) K. Kähler, Met. Zs. **44**, 212, 1927.

een plas of in een vijvertje bij windstil weer. Bij donkere nacht is die weerspiegeling een zeer mooi gezicht!

Heldere sterren van de 1e grootte, die nabij het zenith staan, ziet men zwak weerspiegeld, ongeveer als sterren van de 5e grootte. Een verschil van 4 grootteklassen komt overeen met een verhouding 40 ongeveer van de lichtsterkten: water weerspiegelt dus maar 2,5% van de loodrecht invallende stralen. Sterren die lager staan worden beter weerspiegeld.

Het terugkaatsend vermogen hangt samen met de brekingsaanwijzer, volgens de 'formules van Fresnel'. Voor loodrechte inval is het

$$\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

. In de tabel is grafisch het terugkaatsend vermogen voorgesteld van glas en van water, onder verschillende hoeken *i* met de normaal spiegelend.

We begrijpen nu ook waarom we in de stad geen sterren weerspiegeld zien: de hemel is hier niet donker genoeg, sterren van de 3e grootte zijn al nauwelijks meer zichtbaar; daarenboven is het wateroppervlak zelf teveel verlicht. Alleen planeten zijn nog wel zichtbaar, als ze veel helderder zijn dan de 1e grootte.

Bij dag schijnen de teruggekaatste blauwe hemel, de huizen en de bomen, veel lichtsterker dan 2%; op sommige schilderijen ziet men nauwelijks verschil tussen de helderheid van de voorwerpen en die van hun spiegelbeeld. Dit is eenvoudig gezichtsbedrog.

Er is een volksgeloof, dat sterren niet weerspiegeld worden door **diepe** wateren. Dit mist natuurlijk elke redelijke grond.

| | **Terugkaatsingsvermogen** | |
|---|---|---|
| **invalshoek *i*** | **van water** | **van glas (*n* = 152)** |
| 0 | 0,020 | 0,043 |
| 10 | 0,020 | 0,043 |
| 20 | 0,021 | 0,043 |
| 30 | 0,022 | 0,043 |
| 40 | 0,024 | 0,049 |
| 50 | 0,034 | 0,061 |
| 60 | 0,060 | 0,091 |
| 70 | 0,135 | 0,175 |
| 75 | 0,220 | 0,257 |
| 80 | 0,350 | 0,388 |
| 85 | 0,580 | 0,615 |
| 90 | 1,000 | 1,000 |

## 53. Doorlating van metaalgaas.

Voor het dragen van lichtreklames zijn soms metaalconstructies op de daken opgesteld en met metaalgaas bespannen. Van verre

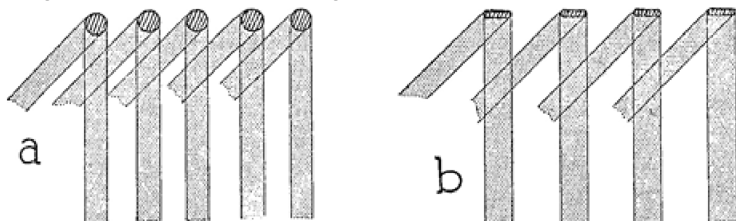



Fig. 65. Doorlating van metaalgaas, gezien vanuit twee verschillende richtingen *a*. het gaas bestaat uit draden met ronde doorsnede; *b*. het gaas bestaat uit platte bandjes.

ziet men de afzonderlijke draden niet meer, het gaas lijkt een gelijkmatig verzwakkende plaat grauw glas. Het is belangwekkend, het gaas van uit toenemend schuine richtingen te bekijken: het wordt dan steeds donkerder.

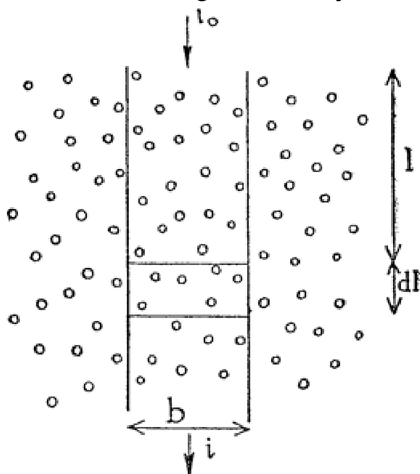



Fig. 66. We berekenen hoeveel licht er tussen de stammen van een bos nog te zien is.

Dit is een bewijs dat het uit draden met *ronde* doorsnee bestaat; was het uit platte bandjes opgebouwd, dan zou het onder elke hoek even donker blijven (fig. 65).

## 54. De ondoorzichtigheid van een bos.

Zolang een bos zich slechts over een geringe diepte uitstrekt, zien we in de verte de lichte lucht tussen de stammen door. Klaarblijkelijk moet er een eenvoudige betrekking zijn die aangeeft welk gedeelte van het licht nog ongehinderd doorgelaten wordt, als wij aannemen dat de bomen volgens het toeval verdeeld zijn, dat er N bomen per $m^2$ voorkomen, en dat zij op ooghoogte een middellijn D hebben.

Beschouw immers een bundel lichtstralen van breedte *b*, die al een lengte *l* door het bos heeft doorlopen (fig. 66). Van de oorspronkelijke lichthoeveelheid $i_0$ is nog *i* over. Als de lichtstralen nog over een kleine afstand *dl* verder lopen, wordt weer een kleine hoeveelheid *di* van het licht weggenomen, en wel is
$di/i = - dl \,.\, b \,.\, N \,.\, D / b = - dl\, ND$.
Hieruit volgt door integratie:
$i = i_0 \,.\, e^{-NDl} = i_0 \,.\, 10^{-0,43\, NDl}$

Er wordt dus minder en minder licht doorgelaten naarmate het bos dieper wordt, juist zoals door een donkere vloeistof minder en minder licht gaat naarmate de laag dikker wordt.

Stel voor een dennebos N = 1 per m$^2$; D = 0,10 m. Dan vinden we ongeveer:

| | |
|---|---|
| *l* = 10 m | $i / i_0$ = 0,37 |
| *l* = 25 m | 0,10 |
| *l* = 50 m | 0,01 |
| *l* = 70 m | 0,001 |

Men ziet hoe snel de ondoorzichtigheid toeneemt. Uit een ruwe schatting van het breukdeel van de gezichteinder dat nog door de bomen vrijgelaten wordt, volgt de diepte van het bos.

Welke waarde heeft ND bij beukebos? Bij jong en oud dennebos?

## 55. Zwevingen tussen twee hekken.

Overal waar men twee hekken, het ene door het andere heen ziet, bemerkt men brede lichte en donkere golvingen in de lichtsterkte, die verlopen zodra men zich beweegt. - Zij ontstaan natuurlijk, doordat de (schijnbare) afstand der staven van elkaar enigszins verschillend is voor de twee hekken, hetzij omdat het éne grover is dan het andere, hetzij doordat ze zich verschillend ver van ons oog bevinden. In bepaalde richtingen schijnen de staven dan ongeveer samen te vallen, in andere vullen de staven van het eerste hek juist de tussenruimten van het andere; zodat er een verschil in de gemiddelde helderheid ontstaat ('in step' - 'out of step').

Heeft men die zwevingen eenmaal opgemerkt, dan ziet men ze op allerlei plaatsen. Elke brug die aan haar beide kanten een hekvormige borstwering draagt, vertoont die helderheidsgolvingen zodra men ze van op een zekere afstand bekijkt. Ze verschijnen ook, als men dwars door een hek de schaduw van datzelfde hek ziet: de periode is dezelfde, maar de afstand tot ons oog is

verschillend. In sommige stations is er metaalgaas om de goederenlift aangebracht: de naar ons toegekeerde zijde en de van ons

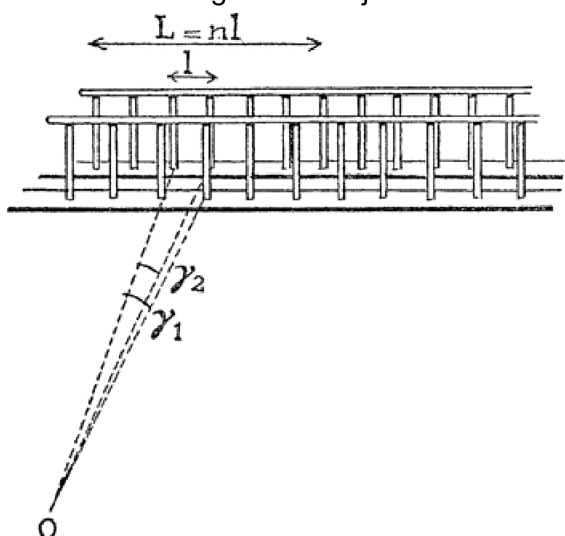



Fig. 67. Zwevingen tussen twee hekken.

afgekeerde zijde vormen samen een soort moiré, hetzelfde dat men ook opmerkt als men twee stukken metaalgaas op elkaar legt, of twee kammen van ongelijke tandafstand.

Beschouw nauwkeuriger het eenvoudige geval (fig. 67), waarin wij twee gelijke hekken op ongelijke afstanden $x_1$ = OA en $x_2$ = OB van ons oog zien; stel *l* de afstand tussen twee opeenvolgende staven, die we zien onder gezichtshoeken

$$\gamma_1 = \frac{l}{x_1}$$

en

$$\gamma_2 = \frac{l}{x_2}$$

.

De lengte ener zwevingsgolf omvat een aantal staven *n*, gegeven door

$$n = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_2} = \frac{x_2}{x_2 - x_1}$$

; dus des te meer naarmate we ons verder van de hekken verwijderen. Daarentegen is de hoek *Θ* waaronder we een zwevingsgolf zien altijd dezelfde, want

$$\Theta = n\gamma_2 = \frac{l}{x_2 - x_1}$$

. De ware lengte

$$L = nl = \frac{lx_2}{x_2 - x_1}$$

ener zwevingsgolf kunnen we bepalen, door evenwijdig aan het hek te lopen: de zwevingsgolven verplaatsen zich met een snelheid, gelijk aan de onze; meet hoever u moet lopen opdat de ene golving nauwkeurig de plaats schijne in te nemen van de vorige. - Onderzoek of elk van die betrekkingen uitkomt. Of andersom, uit de

bepalingen van *n, Θ*, L haalt men de waarden van $x_2$, $x_2$ - $x_1$ en *l*, en kan aldus zonder enig instrument alle afmetingen van op afstand bepalen.

Als de twee hekken een verschillende periode hebben, zien we bij elke beweging van ons oog de zwevingsgolven op de merkwaardigste wijze verlopen; soms in dezelfde richting waarin wij

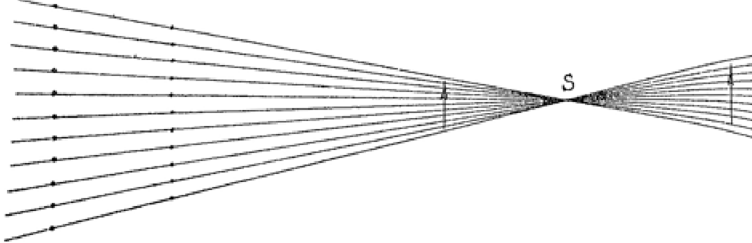



Fig. 68. Zwevingen tussen twee hekken van verschillende periode.

ons verplaatsen, soms in de tegengestelde, naarmate wij ons vóór of achter het 'uitstralingspunt' S bevinden (fig. 68); met andere woorden: naarmate $\gamma_1 < \gamma_2$ of $\gamma_1 > \gamma_2$. De zwevingen verplaatsen zich sneller en sneller als we tot S naderen.

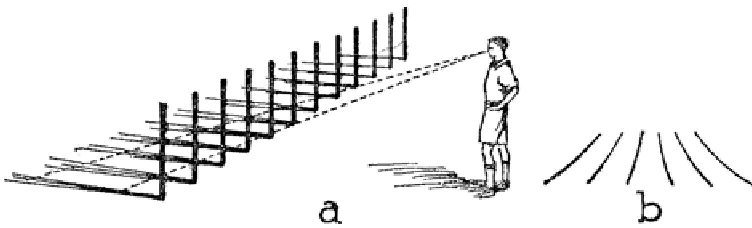



Fig. 69. Zwevingen tussen een hek en de schaduw daarvan. a. waarnemingsomstandigheden b. vorm der zwevingsgolven.

Als een vertikale omheining haar schaduw werpt op een horizontaal terrein, zien de zwevingen er ietwat anders uit (fig. 69); boven liggen ze dichter bij elkaar, onder zijn ze verder van elkaar verwijderd; daarenboven is er een geringe kromming in te onderkennen. Inderdaad klopt dit met de vorige beschouwingen: de afstand tussen de twee interfererende hekfiguren is boven het grootst, wij zien hun periode dus onder een zeer verschillende hoek, en de zwevingen liggen dicht bij elkaar; onderaan is het omgekeerd.

## 56. Fotografische fotometrie.[1)]

In alle fotografie-winkels kan men 'daglichtpapier' kopen, dat in de zon snel een bruinpaarse kleur aanneemt. Ruw kan men zeggen dat de tijd, nodig opdat het papier een bepaalde kleur zou bereiken, omgekeerd evenredig is met de lichtsterkte die op het papier valt ('regel van Bunsen - Roscoe'). Als men dus altijd met hetzelfde papier werkt, en eens en vooral een stukje gewoon bruinpaars papier als 'normaaltint' heeft gekozen, kan men gemakkelijk overal lichtsterkten bepalen: men neemt eenvoudig op hoeveel tijd er nodig is opdat het lichtgevoelige papier de normaaltint zou aannemen. Het normale papier moet zo weinig mogelijk aan het licht blootgesteld worden, om verbleken te vermijden. Onze normale tint kiezen we met zorg. We houden een reepje daglichtpapier in de zon, en dekken er achtereenvolgende trapjes van af, resp. na 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 sekunden; na afloop bekijken wij het papiertje bij zwak licht; de eerste trappen en de laatste vertonen weinig kontrast, de middenste zijn het gunstigst. Kies als normaal een blad papier (boekband, reklameplaat, ....) dat goed effen van kleur is en zo nauwkeurig mogelijk dezelfde tint heeft als een der middenste trapjes; is de *kleurtoon* niet volmaakt dezelfde, dan moet u bij het vergelijken eer letten op de *helderheid*, en die met half gesloten ogen beoordelen. - Merk op, dat we ons daglichtpapier noch ontwikkelen noch fixeren, de gebruikte reepjes kunnen niet bewaard worden.

Op deze wijze heeft Wiesner tal van onderzoekingen over het lichtklimaat uitgevoerd, waaronder de verschillende planten zich ontwikkelen. Hoe ruw de methode ook zij, het is heerlijk om aldus snel, op een groot aantal plaatsen en in allerlei omstandigheden, een schatting te krijgen van een grootheid waarvan zelfs de orde ons niet bekend was!

Onderzoek de belichting van een horizontaal vlak bij verschillende zonshoogte.

Vergelijk de verlichting op een horizontaal vlak bij zonneschijn:

*a.* als een schermpje er schaduw op werpt; *b.* zonder schermpje; vergelijk aldus het licht dat direkt van de zon komt met dat welk door de blauwe hemel wordt uitgezonden.

Vergelijk de verlichting van een naar beneden en een naar boven gekeerd vlak: boven water is de verhouding 6, boven grint 12, boven gras 25.

1) J. Wiesner, Der Lichtgenuss der Pflanzen (Leipzig, 1907).

Vergelijk de helderheid van de blauwe lucht in verschillende richtingen, door verscheiden, even grote kokers onder verschillende hoeken op te stellen, en fotografisch papier op de bodem te leggen. Gewoonlijk blijkt de lucht het donkerst op $90^{o}$ van de zon (vgl. § 176).

Vergelijk de verlichting in een bos en daarbuiten (tenminste 20 m van de bosrand blijven!).

Vergelijk de verlichting in een beukebos *a*. midden Mei; *b*. bij het ontplooien der eerste bladeren; *c*. begin Juni. In een bepaald geval vond men 1/11, 1/30, 1/64 t.o.v. de verlichting buiten het bos.

Meet de verlichtingssterkte op groeiplaatsen van:

| | |
|---|---|
| weegbree (Plantago major) | 1 |
| klimop (Hedera helix) | 1 tot 0,22 (bloeiend) |
| | 1 tot 0,02 (onvruchtbare takken). |
| heidekruid (Calluna vulgaris) | 1 tot 0,10 |
| adelaarsvaren (Pteridium aquilinum) | tot 0,02 |

Bepaal de verlichtingssterkte binnen in boomkruinen: dit is ongeveer de kleinste verlichtingssterkte waarbij zich nog twijgen kunnen ontwikkelen. Voor vrijstaande bomen werd gevonden: lork 0,20; berk 0,11; grove den 0,10; spar 0,03; beuk 0,01 (alles t.o.v. de verlichting buiten de boom).

## Het oog.[1)]

De studie van de mens en de studie van de natuur zijn niet van elkander te scheiden. Als we licht en kleur in het landschap zuiver willen waarnemen, moeten we in de eerste plaats het instrument kennen dat we daarbij voortdurend gebruiken: het menselijk oog. Het werkt in hoge mate verhelderend, wanneer we leren onderscheiden wat de natuur ons inderdaad vertoont, en wat ons gezichtsorgaan daarbij voegt en fantaseert. En nergens zijn de eigenaardigheden van ons oog zo goed te bestuderen als buiten, in de omgeving zelve waaraan wij door de natuur zijn aangepast.

### 57. Zien onder water.[2)]

Heeft U wel eens beproefd Uw ogen onder water open te houden? Een kleine zelfoverwinning, en 't valt erg mee! Maar alle beelden die we nu

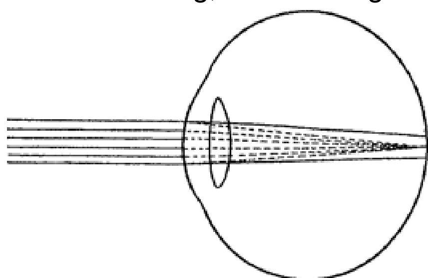


Fig. 70. Bij het zien onder water komt er van de beeldvorming in ons oog niets meer terecht. (Voluitgetrokken: loop der lichtstralen bij het kijken onder water; gestippeld: lichtstralen bij het kijken in lucht).

waarnemen zijn buitengewoon onscherp en wazig, ook al geschiedt de proef in een zweminrichting met zeer helderwater. In de lucht is het namelijk het voorste oppervlak van het oog, het hoornvlies, dat de lichtstralen verzamelt en de afbeelding op het netvlies tot stand brengt; de kristallenshelpt daar slechts een weinig bij. Maar bij de waarneming onder water vervalt

1) Voor dit gehele hoofdstuk en de drie volgende raadplegemen vooral het klassieke werk van Helmholtz: Physiologische Optik (2e of liever 3e uitgave).
2) O.v. Aufsess, Das Sehen unter Wasser (1912). - A. Bierman, Reflex, 7, 39, 1936.

de werking van het hoornvlies, daar de vloeistof in het oog en het water daarbuiten ongeveer even sterk lichtbrekend zijn: de stralen veranderen dus niet van richting aan de hoornvliesgrens (fig. 70). Nu kunnen we uitstekend beoordelen hoe onvoldoende de werking van de kristallens zou zijn, als die alleen voor de beeldvorming moest zorgen. We zijn hopeloos verziende geworden, zozeer, dat de accomodatie praktisch niets helpt; een lichtpunt blijft vrijwel even wazig, op welke afstand het zich ook bevindt. De enige mogelijkheid om nog iets van een voorwerp te herkennen is dus, het zo dicht bij ons oog te houden, dat wij het onder een grote hoek zien, waartegenover de wazigheid van de grenzen niet

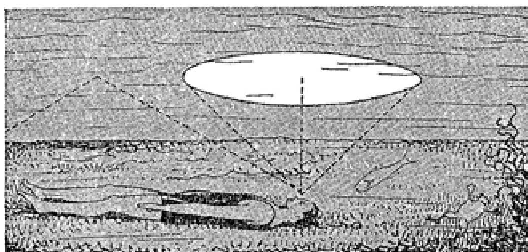


Fig. 71. We bekijken even het landschap op de wijze van de vissen!

al te hinderlijk is.

In helder water begint een cent zichtbaar te worden op armafstand (60 cm); een ijzerdraadje is op geen enkele afstand waarneembaar. Daarentegen kan men tot op 9 m constateren of iemand voorbijzwemt, omdat in dit geval het voorwerp zo groot is, dat wij er allicht iets van merken. Ruw gezegd is de aanwezigheid van een voorwerp van grootte *v* nog waar te nemen op een afstand van ten hoogste 30 *v*; zijn vorm is enigszins vast te stellen op een afstand van 5 *v*; en van redelijk zien is slechts sprake als het voorwerp tot op een afstand gelijk aan zijn eigen afmeting *v* genaderd is.

Om ons gezichtsvermogen weer enigszins normaal te maken, is dus een zeer sterke bril nodig. Maar het ongeluk wil, dat brilleglazen onder water 4 maal minder sterk werken dan in lucht! En daar komt nog bij, dat een zo sterke bril niet zijn volle effekt heeft zodra men hem enige millimeters vóór het oog zet. Dit alles in aanmerking genomen, is het nodig een lens van sterkte 100 te nemen, dus van brandpuntsafstand 1 cm! Het lensje van een dradenteller is hiervoor bruikbaar.

Let er op, hoe moeilijk de afstanden te schatten zijn, zowel met als zonder waterbril. De voorwerpen zien er schimmig, spookachtig uit.

Het is nog de moeite waard, van onder water de blik opwaarts te richten. Lichtstralen die van buiten komen dringen in het water onder hoeken met de vertikaal van ten hoogste 46°; u ziet dus boven uw hoofd een grote lichte schijf; als u uw blik schuiner richt, wordt uw gezichtsstraal totaal teruggekaatst tegen het oppervlak, en brengt u slechts de weerspiegeling van de zwak verlichte bodem (fig. 71). Zo ziet er de wereld voor de vissen uit!

Een zeer goede indruk van het landschap, gezien van onder water, krijgt men, door een spiegel in schuine stand onder het oppervlak te houden, terwijl men zelf rechtop in het water staat en vooral het rimpelen van het oppervlak vermijdt. Merk op hoe alle voorwerpen buiten het water sterk samengedrukt lijken in vertikale richting, des te meer naarmate ze tot de horizon naderen. Alles is met prachtige gekleurde randen omzoomd!

## 58. Het zichtbaar worden van het inwendige van ons oog.

Een geoefend waarnemer kan zonder enig hulpmiddel de gele vlek van zijn eigen oog zien (het gevoeligste en centrale punt van het netvlies), omgeven door een donkerder krans waarin de bloedvaten ontbreken.[1)] Men kijkt bij avond naar de wijde, wolkenloze lucht, als de eerste sterren beginnen te verschijnen, en men al een tijdje buiten is. Sluit de ogen enige sekunden, en open ze dan snel, terwijl uw blik naar de hemel gericht is. De duisternis verdwijnt eerst aan de omtrek van het gezichtsveld, en trekt zich snel naar 't midden samen, waar de gele vlek met haar donkere zoom even zichtbaar wordt; soms licht ze even op.

Als men langs een hoog hek loopt, waar doorheen de felle zon schijnt, krijgt men verscheiden malen per sekunde een flits zonlicht in de ogen. Blijf voor u uit kijken, keer de ogen niet rechtstreeks naar de zon! Het merkwaardige is, dat u nu bij elke lichtflits éven een onduidelijke figuur ziet van onregelmatige vlekken en mazen en vertakkingen, helder op een donkerder achtergrond.[2)] Het is mogelijk dat dit bepaalde delen van het netvlies zijn, die we bij deze ongewone belichting zien verschijnen.

1) H. von Helmholtz, Physiologische Optik, 3e uitg. **2**, 255. Deze proef gelukt mijzelf niet.
2) Waarschijnlijk komt deze waarneming overeen met de 'lichtschaduwfiguur van Purkinje' (Helmholtz, t.a.p. blz. 217).

## 59. Afwijkingen van de scherpe beeldvorming bij het oog.

Sterren zien we niet als zuivere stipjes, maar als kleine onregelmatige figuurtjes, dikwijls als een lichtpuntje waarvan stralen uitgaan; de gewone voorstelling door 5-stralige sterretjes komt niet met de werkelijkheid overeen. Kies voor deze proef de allerhelderste sterren, liefst Sirius; of beter nog de planeten Venus of Jupiter: die vertonen ons een zó klein schijfje dat wij ze praktisch puntvormig zien, en ze zijn helderder dan de helderste sterren.

Houd het hoofd schuin naar rechts, naar links: het figuurtje helt mee. Voor ieder mens is het anders, het is ook verschillend voor elk der beide ogen; maar als men één oog met de hand bedekt en achtereenvolgens met het andere naar allerlei sterren kijkt, ziet men altijd hetzelfde figuurtje.

Het zijn dus niet de sterren zelf, die er zo onregelmatig uitzien, het is ons oog dat fouten vertoont, en een

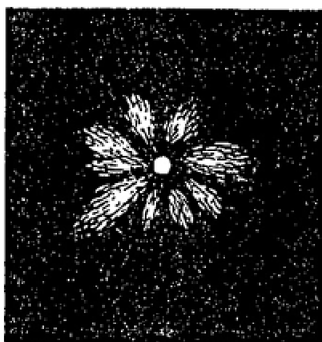


Fig. 72. Een ster of verre lantaren, gezien door een lichtelijk bijziende zonder lorgnet.

punt niet precies als een punt afbeeldt.

De stralenfiguur wordt groter en onregelmatiger, wanneer het oog zich in een donkere omgeving bevindt en de pupil wijd geopend is; ze wordt kleiner, als we ons in een goedverlichte omgeving bevinden en de pupil tot een klein gaatje samengetrokken is. Inderdaad heeft Gullstrand bewezen, dat de kristallens van ons oog voornamelijk aan de randen vervormd wordt door de spier waaraan ze bevestigd zit, de afbeeldingsscherpte zal ervan afhangen of er door die randgedeelten licht doorgaat of niet.

Neem een blad papier, prik er een gaatje in van wel 1 mm wijd, en houd dit midden voor de pupil. Na enig zoeken slaagt u er wel in, Sirius of een planeet op te sporen: het beeld is zuiver rond. Verplaats nu het gaatje naar de rand van de pupil: daar vervormt zich het lichtpunt op onregelmatige wijze, bij mij rekt het uit tot een lichtlijntje, volgens de straal van de pupil gericht.

Vele mensen zien ook de horens van de maansikkel veelvoudig. Deze afwijkingen van de scherpe beeldvorming zijn in hoofdzaak toe te schrijven aan kleine vervormingen in de oppervlakte van het hoornvlies. Dezelfde vervormingen zien we ook te voorschijn komen wanneer we bijziend zijn, en ons lorgnet buiten afzetten (fig. 72): elke verre lantaren wordt dan een lichtschijfje, waarin de helderheid echter zeer ongelijkmatig verdeeld is. Als het kleine

druppeltjes regent, ziet u af en toe plotseling een zwart rond vlekje in dat lichtschijfje verschijnen: een regendruppel bedekt een deel van het hoornvlies (fig. 73). U kunt merken dat hij wel een 10-tal sekunden zijn vorm behoudt, indien u er in slaagt al die tijd niet met de oogleden te knippen!

Wanneer een automobiel

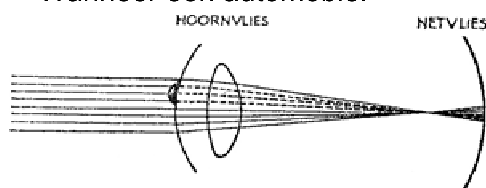



Fig. 73. Een bijziend oog zonder lorgnet ziet de verre lichtbronnen als onregelmatige schijfjes; een regendruppel op het hoornvlies tekent zich daarin als een donker vlekje af.

op grote afstand zijn felle lampen in onze richting keert, zien we het gehele gezichtsveld in de omgeving van het intense lichtpunt met een lichtwaas bedekt; dit lichtveld is korrelig, soms straalsgewijs gestreept. Deze struktuur ontstaat door lichtbuiging of breking aan een groot aantal onregelmatigheidjes in het oog. Natriumlampen, die de vorm hebben van lange, smalle buizen, geven ook een diffuse schijn om de lichtbron; maar deze lichtschijn vertoont een fijne arcering, waarvan de lijntjes precies evenwijdig aan de lichtbron lopen: elk buigend korreltje heeft nu een lichtlijntje in plaats van een lichtpuntje gegeven.

## 60. Stralenbundels die van heldere lichtbronnen schijnen uit te gaan.

Lantarens in de verte schijnen soms lange, rechte stralen naar ons oog te schieten. Dat is vooral zo, wanneer we met halfgesloten oogleden kijken; langs de rand van elk ooglid vormt het traanvocht een kleine meniskus die de lichtstralen breekt.[1)] Uit fig. 74a ziet men, dat de stralen aan de rand van het *bovenste* ooglid zó gebroken worden, dat ze *van beneden* schijnen te komen: de lichtbron krijgt een naar beneden gerichte staart; het onderste ooglid geeft evenzo een naar boven gerichte staart. Men kan de vorming dezer staarten heel goed volgen, door het éne ooglid vast te houden, en het andere zachtjes te sluiten; of door het hoofd schuin naar boven of naar beneden te richten terwijl men de oogleden half dicht luikt. De stralen verschijnen precies op

1) H. Meyer, Pogg. Ann. **89**, 429, 1853.

het ogenblik waarop het ooglid de pupil begint te bedekken; een bijziend waarnemer kan dat heel goed opmerken, daar de lichtbron, die hij schijfvormig verbreed ziet, op dat ogenblik voor een gedeelte afgeschermd wordt. De stralen zijn niet geheel evenwijdig, ook niet die van één oog. Kijk naar een lichtbron vóór u, keer daarna het hoofd wat naar rechts en draai de ogen tot u die lichtbron weer ziet: de stralen staan nu schuin (fig. 74b). Dit komt blijkbaar, omdat de randen der oogleden nu niet meer horizontaal staan daar waar ze over de pupil heen lopen; elke

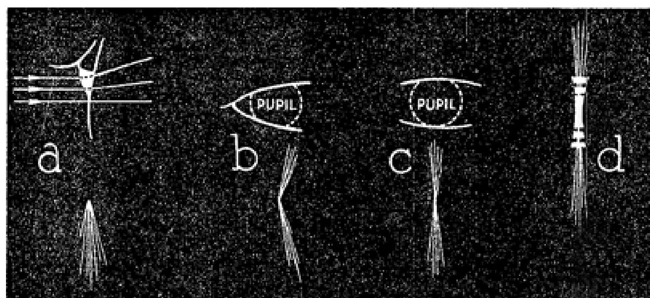



Fig. 74. Het ontstaan van lichtstralen om de lantarens in de verte.

stralenbundel is loodrecht op de ooglidrand die hem veroorzaakt, 't komt precies uit met de richting. We begrijpen nu ook, dat de stralen niet evenwijdig zijn als we voor ons uit kijken: het is de gebogenheid der ooglidranden die reeds binnen de breedte der pupil merkbaar is. Houd uw vinger aan de rechterrand der pupil: de linker stralen van de bundel verdwijnen, precies zoals het moest.

Naast de lange staarten (fig. 74c) zijn er ook korte, zeer lichtsterke, die door *terugkaatsing* tegen de randen van de oogleden ontstaan (fig. 74d). Overtuig u ervan, dat ditmaal het *bovenste* ooglid de *bovenste* korte staart veroorzaakt, en omgekeerd. Deze terugkaatsingsstralen vertonen meestal dwarse buigingsstrepen.

## 61. Waarnemingen aan lorgnetglazen.

Gewone lorgnetglazen vervormen de lijnen, zodra men er sterk schuin doorheen kijkt. Bij holle glazen is de vervorming ‘tonvormig’, bij bolle glazen ‘kussenvormig’ (fig. 75). Wanneer het

er op aankomt te beoordelen of een lijn in het landschap zuiver recht is of loodrecht staat, is die vervorming bijzonder hinderlijk. Aan de uiterste grenzen van

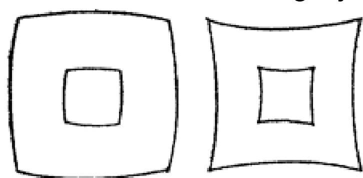


Fig. 75. Beeldvervorming door lorgnetglazen.

het veld treedt een zo sterk astigmatisme op, dat allerlei kleine bijzonderheden weggewist worden. Deze gebreken van de beeldvorming zijn des te sterker naarmate de glazen holler of boller zijn, zij zijn veel geringer bij meniscusglazen.

Wie 's avonds door zijn lorgnet naar een brandende lantaren kijkt, ziet ergens in de nabijheid daarvan een lichtschijfje zweven.

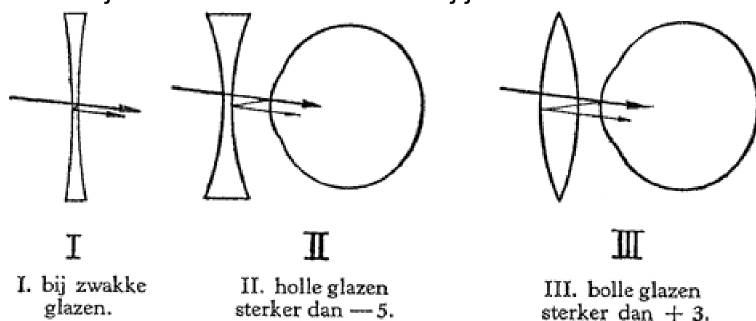



Fig. 76. Het ontstaan van dubbele reflexen bij het gebruik van een lorgnet.

Het is niet scherp; als wij ernaar turen verandert vanzelf de accomodatie van het oog, en we zien het schijfje groter of kleiner worden. Nemen we ons lorgnet af

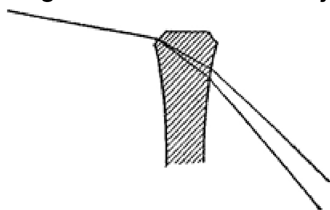


Fig. 77. Hoe een lorgnetglas een spektrum kan geven.

en houden dit een eindje vóór ons oog, dan zien we 't schijfje overgaan in een scherp lichtpuntje dat blijkbaar een zeer verkleind beeld van de lamp is. Bekijk een groep van 3 lampen: het blijkt dat het beeldje rechtopstaand is. - Verklaring: het lichtschijfje ontstaat door een dubbele weerspiegeling tegen de oppervlakken van het lorgnetglas of tegen het hoornvlies van het oog. Er zouden dus eigenlijk 3 van die

schijfjes te zien moeten zijn, maar men bemerkt alleen dat wat niet al te onscherp is; praktisch treedt bij een gegeven brilleglas slechts één soort dubbele reflex op[1] (fig. 76).

Bij glazen zonder montuur ziet men soms aan de uiterste rand een smal spektrum van de lampen in de verte: dit ontstaat als er een schuin randje aan de glazen geslepen is (fig. 77).

Regendruppels op lorgnetglazen: zie § 118.

## 62. Onderscheidingsvermogen van het oog.

Ieder normaal oog onderscheidt gemakkelijk Mizar en Alcor in De Grote Beer, op een afstand van bijna 12' van elkaar.

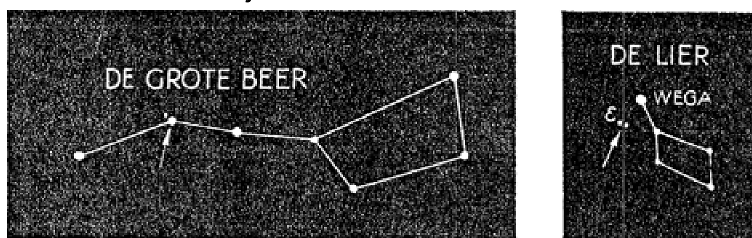



Fig. 78. Enkele wijde dubbelsterren.

(fig. 61 en 78). De vraag is nu, hoeveel verder men nog komen kan. Met scherpe ogen ziet men dubbel:

*α* van de Steenbok - afstand der componenten 6', grootten 3,8-4,5.

*α* van de Weegschaal - afstand der componenten 4', grootten 2,8-5,3.

Een afstand van 3' wordt slechts door een uiterst klein aantal mensen bereikt.

De zeer enkele uitzonderlijke goede waarnemers, bij heldere en rustige lucht observerend, kunnen ongelofelijk veel bijzonderheden onderscheiden.

Een hunner[2] beweert dat hij met het blote oog *α* van de Weegschaal als dubbelster ziet (afstand bijna 4'). Saturnus is voor hem duidelijk langwerpig; Venus vertoont de sikkelvorm, althans op

1) W.J. de Bruyne, Reflex, **7**, 7, 1936.
2) Stoddard, M.N. **13**, 156, 1852.

geschikte tijden en als men door een donker glas kijkt of door een rookpluim die toevallig de goede doorlating heeft. Hij kan zelfs een paar satellieten van Jupiter zien, maar alleen in de schemering, op het ogenblik dat de sterren van de 1e en 2e grootte beginnen te verschijnen.

Ook voor andere waarnemingen is de schemering het beste ogenblik. Dan zijn de bijzonderheden van het maan-oppervlak duidelijker

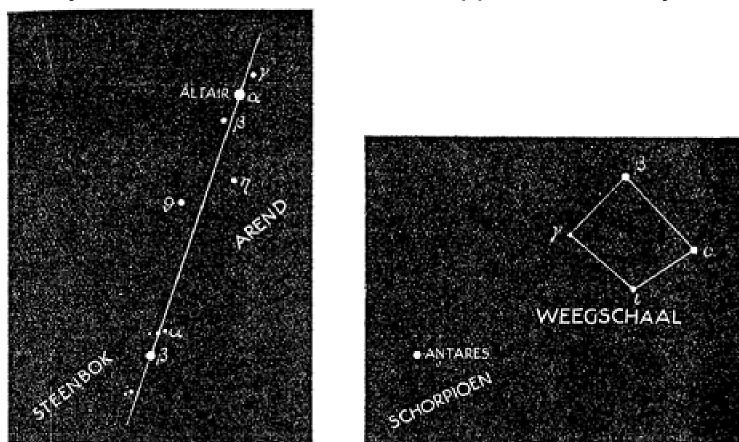



Fig. 78.

te zien dan in de nacht, daar men minder verblind wordt. - Het is een leuke sport om het smalle maansikkeltje zo kort mogelijk na de nieuwe maan waar te nemen, sommigen hebben het gebracht tot een tijdsinterval van slechts enkele uren! Natuurlijk is het ook hiervoor van groot belang, te weten *waar* men kijken moet.

## 63. Lichtgevoeligheid van het rechtstreekse en perifere gezichtsveld.

Wat zijn de zwakste sterren die u nog kunt zien? Kijk naar het vierkant van de Grote Beer en vergelijk met ons kaartje (fig. 61).

De meeste mensen zien nog de 6e grootteklasse, sommige de 7e. Dergelijke waarnemingen moeten geschieden ver van het licht der steden en bij heldere lucht.

Nu gaan we onderzoeken welke sterren u nog kunt zien *als u ze scherp, rechtstreeks aankijkt.* Wilskracht is daartoe nodig: wilskracht om de blik niet af te wenden en hem nauwkeurig op

de ster te blijven richten. We bemerken nu het verrassende, dat elke zwakke ster verdwijnt zodra men ze scherp aankijkt; kijkt men er even naast, dan verschijnt ze weer! Voor mij worden de sterren van de 4e grootte al onzichtbaar; terwijl ik die van de 3e nog blijf zien (gebruik fig. 61 en 62). Er is dus een verschil van wel 3 grootteklassen tussen de drempelwaarde voor de gele vlek en die voor het omgevende netvlies. Dat komt overeen met een faktor 16 in de lichtsterkte! Dit verschil in gevoeligheid is te wijten aan het feit, dat het centrale gedeelte van de gele vlek vrijwel alleen met kegeltjes bezet is, het omgevende ('perifere') netvlies ook met staafjes, die veel lichtgevoeliger zijn. Zelfs geoefende waarnemers zullen verbaasd zijn over de grootte van het effekt: zozeer zijn we gewoon onbewust onze blik een weinig van de zwakke sterren af te wenden, om ze beter te zien.

Het is de moeite waard, een heldere ster of een planeet (bv. Venus) in de ochtendschemering te volgen. Naarmate de hemel helderder wordt, is het moeilijker en moeilijker het lichtpuntje te onderscheiden. Het merkwaardige is nu, dat men het dikwijls *daarom* niet ziet, omdat men niet in de goede richting kijkt, terwijl men het wel kan waarnemen als men het maar eenmaal teruggevonden heeft. Hetzelfde kan men ook opmerken als men beproeft een leeuwerik te vinden die in de blauwe lucht kwinkeleert. - Als men maar goed oplet, kan men Venus dikwijls volgen tot het volop licht is geworden, en haar de hele dag blijven zien. Met Jupiter gelukt dit soms, maar moeilijker; het is al iets bijzonders wanneer men hem kan waarnemen tot de zon een hoogte van $10^{o}$ bereikt heeft.[1)] Zijn deze waarnemingen niet in tegenstrijdigheid met de geringere gevoeligheid van de gele vlek, die we uit onze proeven met sterren hadden afgeleid? Toch niet: de staafjes komen slechts in werking bij heel zwak licht, bij dag zijn ze uitgeschakeld; in die omstandigheden is het groefje van de gele vlek het gevoeligst, terwijl 's nachts de rollen omgekeerd zijn.

## 64. Proef van Fechner.

Als er lichte, wazige wolkjes aan de hemel zijn, zoeken wij er eentje uit dat nog net merkbaar van de achtergrond van de hemel te onderscheiden is. Houd nu voor het oog een stukje rook-

1) Ann. d. Hydr. **37**, 1909. - Hemel en Dampkr. **14**, 60 en 180, 1916; **17**, 68, 1919.

glas, of een glaasje dat boven de vlam van een kaars licht beroet is, of een ontwikkelde fotografische plaat: hetzelfde wolkje is nu weer net onderscheidbaar.

Fechner besloot hieruit, dat het oog twee helderheden onderscheiden kan, als hun *verhouding* (niet hun *verschil*) een bepaald constant bedrag bereikt (de ene ongeveer 5% groter dan de andere).

Herhaal de proef met een *zeer* donker glas: het wolkje is nu niet meer zichtbaar, al de fijne schakeringen zijn verdwenen. Het net onderscheidbare breukdeel is dus niet geheel constant.

Een tegenhanger van de proef van Fechner is het zich iedere dag herhalende verdwijnen van de sterren. Het helderheids*verschil* van de ster ten opzichte harer omgeving is altijd hetzelfde; maar de *verhouding* is heel anders bij dag dan bij nacht.

## 65. Het landschap bij maanlicht.[1)]

Als de wet van Fechner gold, en het oog alleen intensiteitsverhoudingen zag, zou een landschap in de maneschijn geen andere indruk kunnen maken dan hetzelfde landschap bij zonlicht: alle lichtsterkten zijn duizenden malen geringer, maar de voorwerpen worden op dezelfde wijze verlicht door een lichtbron van ongeveer gelijke vorm en stand.

Hier ziet men bijzonder duidelijk dat de wet van Fechner bij zeer geringe helderheden niet meer doorgaat. Ga een landschap bij maneschijn waarnemen en geef u rekenschap van het verschil vergeleken met de verlichting bij dag! Het typische is, *dat bij maneschijn alles wat niet vol verlicht is zich vrijwel eenvormig donker vertoont*, terwijl daar bij dag nog allerlei helderheidsgraden in voorkomen. Zo komt het dat het fotografische negatief van een landschap met zon, onderbelicht en donker afgedrukt, de indruk weergeeft die we van een landschap met maneschijn krijgen. De schilders geven ons op een dergelijke wijze de suggestie van het nachtelijke landschap, door alles bijna even donker weer te geven; het verzwakken van de tegenstellingen wekt in ons de onbewuste indruk dat de verlichting wel heel gering moet zijn. Zie ook § 77.

1) H.v. Helmholtz, Optisches über Malerei, blz. 71 (Populäre Wiss. Vorträge). 1871-73.

## 66. Het landschap bij felle zonneschijn.[1)]

Aan 't strand bijvoorbeeld, op een zomerdag, zijn de helderheden zo groot, dat *verblinding* begint te dreigen.

De helderheidsverschillen lijken kleiner dan bij gemiddelde verlichting, alles lijkt ongeveer even fel in de gloeiende zonneschijn. Ook dit is een effekt waar de schilders gebruik van maken. (vgl. § 65).

## 67. Drempelwaarde voor het waarnemen van helderheidsverhoudingen.

De ruiten der huizen weerspiegelen het zonlicht en werpen lichtvlekken op de straatkeien (§ 8). Als de straat zelf ook door de zon beschenen wordt, zijn die lichtvlekken niet goed te zien, omdat de grond zo weinig gelijkmatig is. Maar als een vensterraam een weinig beweegt, merken we de lichtvlek ineens op; of als we voorbijlopen, en onze schaduw als een zwakke schim over de lichtvlek glijdt. (Is dat geen merkwaardige psychologische bijzonderheid? Ons oog heeft stellig een bijzondere geschiktheid om zwakke lichtverschijnselen op te merken die zich als een eenheid verplaatsen). Een glazen plaat kaatst 4% terug aan elk van zijn oppervlakken, 8% totaal; bij schuine inval wordt het iets meer (§ 52). Blijkbaar is dus een helderheidstoeneming van 10% ongeveer de drempelwaarde van wat ons oog in gewone omstandigheden en zonder bijzondere voorzorgen onderscheiden kan.

Een kleine plas water ligt vóór een zonbeschenen muur; het weerspiegelde zonlicht moest een lichtvlek op de muur geven. Als de wind het water rimpelt, zien we lichtlijnen over de muur lopen (§ 8), maar overigens is de lichtvlek ternauwernood zichtbaar, tenzij bij een heel effen muur of op een deurpaneel. Een helderheidstoeneming van 3% is dus alleen in zeer gunstige omstandigheden waar te nemen (§ 87).

Stel u 's avonds tussen twee lantarens, zó dicht bij de ene dat de schaduw die de andere wierp net verdwijnt. Uit de afstand tot beide lantarens is de verhouding der verlichtingen af te leiden; dus ook: hoeveel procent de schaduw zich nog onderscheidt van het omgevende veld.

1) H.v. Helmholtz, Optisches über Malerei blz. 71 (Populäre Wiss. Vorträge).

## 68. Gordijn-effekt.

We lopen buiten, bij dag. Hoe komt het, dat een *doorzichtige* tullen gordijn ons toch belet te zien wat er in de kamers van de huizen gebeurt? - De gordijnsluier is sterk belicht; als de voorwerpen in de kamer slechts een paar procent van die helderheid hebben, zijn de relatieve helderheidsverschillen te klein om onderscheiden te worden: een toepassing dus van de wet van Fechner (§ 64)!

Bij avond, als de lamp in de kamer brandt, ziet men zonder meer door de lichte sluier heen: hij is nu van onze zijde bijna onbelicht, op de verschillend heldere voorwerpen in de kamer superponeert zich slechts een zeer zwakke extra-belichting.

Het effekt is in beide gevallen omgekeerd voor wie in de kamer is, en naar buiten kijkt.

Een dergelijk verschijnsel is het volgende: een vliegtuig, dat bij maanlicht gemakkelijk zichtbaar was, wordt soms onvindbaar als men beproeft het met een zoeklicht beter te belichten! De lucht tussen ons oog en het vliegtuig wordt door de bundel fel verlicht, en belet ons de zwakke lichtkontrasten daarachter te zien.

## 69. De zichtbaarheid der sterren bij dag.

We beginnen met te letten op de zichtbaarheid der sterren in de nacht. Hoe donkerder de hemel, hoe meer sterren zichtbaar worden; daarentegen verdwijnen zij, wanneer er maanlicht is dat door de lucht wordt verstrooid en een algemene helderheid over het uitspansel verspreidt: het is een waar gordijn-effekt (§ 68).

> *Om de maan, die vol is en schoon, verbergen weer hun glans de fonkelend-lichte sterren, als zij straalt haar zilveren schijnsel, wijduit over de aarde.*
>
> *Sappho*[1] (*Bergk, Poetae Lyr. Graec. III, 3*).

Een kind dacht dat een wolk voor de maan wel voldoende zou zijn om de sterren weer zichtbaar te maken. Waarom is dit niet het geval? (fig. 79).

Door waarneming van de sterren die nog net zichtbaar zijn, kan men krommen tekenen die aangeven hoe de helderheid over de hemel in de buurt van de maan verdeeld is.

1) Merk de voortreffelijk waargenomen bijzonderheden op: '*om* de maan' ....; 'verbergen weer hun glans ....', want bij het opgaan der maan verdwijnen sterren die eerst zichtbaar waren.

Bij dag is de hemel nog veel sterker verlicht, en dan zijn de sterren volkomen onzichtbaar. Daarboven is ons oog dan aan het volle licht aangepast, en daardoor duizenden malen minder gevoelig,

Er is een merkwaardig verhaal,[1] dat reeds van de tijd van Aristoteles dagtekent: van uit diepe putten, mijnschachten, schoorstenen zou de lucht donkerder schijnen dan we haar

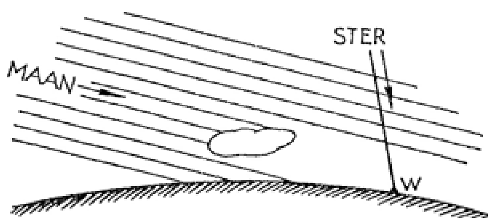



Fig. 79. Een wolk vóór de maan is niet voldoende om voor waarnemer W de sterren goed zichtbaar te maken.

gewoonlijk zien, en zou het zelfs mogelijk zijn enkele heldere sterren waar te nemen. Sedertdien hebben een aantal schrijvers het verschijnsel vermeld, merendeels echter naar hun herinnering of naar de verhalen van anderen. Op geen enkele plaats kan men het verschijnsel thans normaal zien en bestuderen. Aanbevolen wordt, een proef te nemen met een koker van 12 m lengte en 0,50 m middellijn; verder moet er in Valkenburg een gang van de grot zijn, van waaruit men de hemel ziet en waar de proef geprobeerd zou kunnen worden. - Het effekt zou alleen daarin kunnen bestaan, dat het oog minder verblind is door licht dat van de hele omgeving invalt. Dit heeft echter stellig slechts een kleine invloed, daar het veld naar hetwelk we rechtstreeks kijken toch altijd verlicht blijft, en in elk opzicht de doorslag geeft.

Nog minder waarschijnlijk is de bewering, dat men bij dag sterren weerspiegeld zou kunnen zien in donkere bergmeren. De 'waarnemers' hebben wel opgemerkt hoe donker de weerspiegeling van de hemel was, maar hebben vergeten dat de sterren in precies dezelfde verhouding door de weerspiegeling verzwakt worden.

> *Tegen de ochtend werd het zeer donker, daar de sterren uitgedoofd werden, en de schemering dit lichtverlies nog niet voldoende kon vergoeden.* (*!!!*)
>
> *Walter Scott, Waverley, hoofdstuk* **47**.

1) W. van der Elst, Hemel en Dampkring, **21**, 2, 1923.

## 70. Gezichtsbedrog bij helderheidsschattingen.[1]

Als twee sterren zo dicht bij elkaar staan dat hun beelden tegelijk op de gele vlek vallen, schijnt men hun helderheden stelselmatig fout te schatten: *men schat de onderste te helder*. Deze fout verdwijnt, als de sterren horizontaal komen te staan tengevolge van de draaiing van het hemelgewelf. Merkwaardigerwijze verdwijnt de begoocheling ook als men er maar in slaagt zich *voor te stellen* dat de verbindingslijn der sterren horizontaal loopt.

Ik durf bijna niet zeggen hoe groot de fout soms kan zijn: men spreekt van 2 tot 3 grootteklassen!!

## 71. Overstraling (= irradiatie).

De ondergaande zon schijnt een indeuking in de gezichteinder teweeg te brengen (fig. 80).

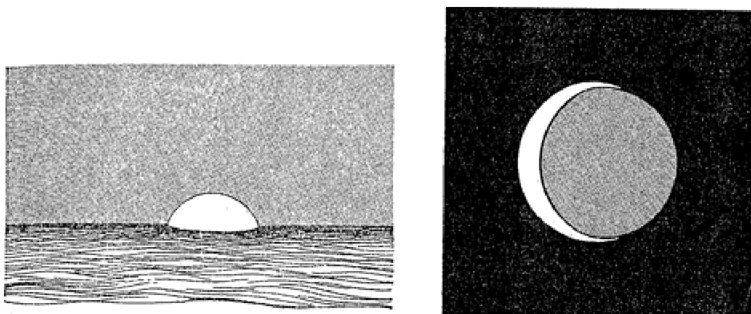


Fig. 80. Voorbeelden van overstraling: de ondergaande zon en de maansikkel.

Als het eerste sikkeltje van de maan verschijnt, en de overige delen van de maanschijf zwak schemeren in ‘het asgrauwe licht’ valt het ons op dat de buitenrand van de sikkel tot een grotercirkel schijnt te behoren dan de buitenrand van het asgrauwe licht (fig. 80). Tycho Brahe schatte dat de diameters zich verhielden als 6:5.[2]

Zwarte kleren doen ons slanker schijnen dan witte.

1) Hemel en Dampkring, **14**, 7, 1916, naar een onderzoek van Hayer.
2) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 17.

‘Dit bemerken we; als we de zon bekijken door de ontbladerde boomtakken: alle takken die zich vóór de zonneschijf bevinden zijn zo dun geworden dat men ze niet meer ziet. Evenzo een speer die men tussen het oog en de zonneschijf houdt.’

‘Eens zag ik een vrouw in 't zwart gekleed met een witte hoofddoek; die doek scheen tweemaal zo breed als haar schouders welke zwart waren gekleed.’

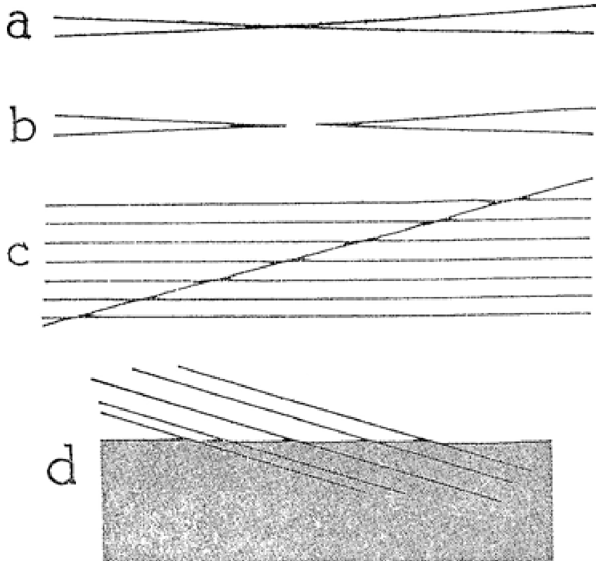



Fig. 81. Voorbeelden van overstraling bij telegraafdraden.

‘De kantelen der versterkingen hebben tussenruimten die even breed zijn als de opstekende stukken; en toch lijken de eerste nogal wat breder dan de tweede.’[1)]

Dikwijls ziet men twee dunne telegraafdraden die elkaar onder een zeer kleine hoek schijnen te snijden als men van uit de geschikte richting kijkt (fig. 81a). Nu is het merkwaardige, dat tegen de achtergrond der lucht het snijpunt als 't ware verdwijnt, overstraald door de grote helderheid daarnaast, en door tegenstelling

1) Lionardo da Vinci, Trattato (uitg. 1804, blz. 308-315).

tegenover de donkere draden van dubbele dikte links en rechts. Zodra de wind maar even de draden iets verplaatst, loopt de witte onderbreking heen en weer (fig. 81b).

Daarentegen is het beeld anders als men een telegraafdraad ziet tegen een geribbelde achtergrond van trappen, pannen daken, een bakstenen gevel: hij lijkt dan eigenaardig gezwollen of bochtig overal waar hij een donkere ribbel kruist. Hetzelfde verschijnsel treedt op waar bv. de omtrek van een kar zich tegen zulk een achtergrond aftekent (fig. 81d).

De oorsprong van al deze vervormingen ligt in het feit, dat de beelden in ons oog door buiging en onvolmaakte afbeelding gewijzigd worden; wij leggen de grenzen der velden daar, waar de helderheid het snelst verandert, - en dit is bij het door buiging onscherp geworden beeld dikwijls op een andere plaats dan in de ideale afbeelding. Inzonderheid verschuift aldus de grenslijn stelselmatig naar buiten voor heldere velden in donkere omgeving: dit is het verschijnsel dat men ‘overstraling’ noemt, en waarvan we hier enkele voorbeelden hebben leren kennen.

## 72. Verblinding.

Wanneer de lichtsterkte die in het oog valt te groot is, treedt ‘verblinding’ op. Men verstaat hieronder twee verschillende dingen:

1. doordat een sterke lichtbron in het gezichtsveld komt, worden de overige delen van het gezichtsveld niet goed meer waar te nemen;
2. er ontstaan een indruk van duizeligheid of pijn.

Het eerste is het geval, als een automobiel ons in de nacht tegemoet komt, en zijn felle koplampen op ons heeft gericht. We zien de bomen langs de weg niet meer en zouden er haast tegen aan lopen. Een aandachtiger onderzoek van ons gezichtstafereel op dit ogenblik leert, dat alles wat we zien, overtogen is met een lichtwaas, vele malen sterker dan het zwakke nachtelijke schijnsel der bomen en andere dingen. Dit algemene lichtwaas ontstaat door verstrooiing van de invallende stralen in de middenstoffen van het oog, welke altijd voldoende korrelig en inhomogeen zijn om verstrooiend te werken. Het schijnt zelfs, dat het verblindende licht niet alleen door de pupil in het oog komt, maar ook voor een gedeelte dwars door de harde oogrok. Hierbij komt, dat het netvlies in de nabijheid van het verlicht gedeelte ineens een veel geringere gevoeligheid krijgt.

Het tweede gevoel dat bij de verblinding optreedt, is goed te merken als we overdag naar de hemel kijken. We stellen ons in de schaduw van een huis, om de direkte waarneming van de zon te vermijden. Hoe dichter onze blik bij dit hemellichaam komt, des te onverdragelijker de felle lichtschijn van de lucht; als er witte wolken zijn, is die schijn haast niet uit te houden. Het is zeer merkwaardig hoe, onder verschillende personen, de één veel gevoeliger is dan de andere en sneller het gevoel van pijnlijke verblinding krijgt.

## De kleuren.

*Alles wat leeft streeft naar kleur.*
*Goethe, Farbenlehre, I*, 1, 586.

### 73. Kleurenmenging.

Wanneer we door de ruitjes van een treincoupé naar buiten kijken, zien we tevens het zwakke weerspiegelde beeld van het landschap aan de andere zijde van de trein. Beide beelden overdekken elkaar, en men kan de mengkleur beoordelen. Het spiegelbeeld van de blauwe lucht maakt de

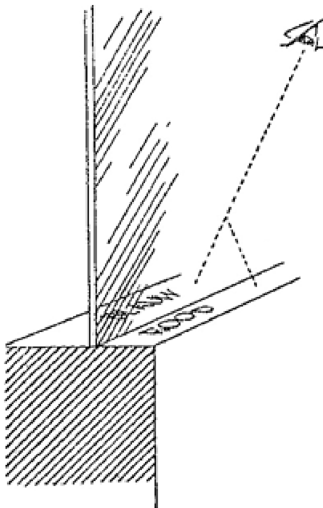


Fig. 82. Kleurenmenging, waargenomen aan winkelruiten.

groene weide groenblauw; tevens is het opvallend hoe de kleur bleker en minder verzadigd wordt: een algemeen verschijnsel bij kleurenmenging.

Aan moderne winkelruiten is er dikwijls geen lijst; men ziet dan van uit O tegelijk dwars door de ruit het binnenste van het vensterkozijn A, en de weerspiegeling van het buitenste gedeelte B (fig. 82). Als A en B verschillend gekleurd zijn treden prachtige mengkleuren op; naar gelang men het oog lager of hoger houdt naderen ze meer tot A of tot B, wat tevens bewijst dat de ruit onder grote invalshoeken meer licht terugkaatst.

De natuur mengt de kleuren nog op een andere wijze voor ons. De bloemen van een weide versmelten op afstand tot één enkele tint; paardebloemen op groen gras kunnen een geelgroene mengkleur geven. Appelbomen en perebomen in bloei zijn vuilwit (ja, *vuilwit*!): een mengkleur van de roze of witte bloemblaadjes, de groene bladeren, de rode helmknoppen der perebomen of de

gele helmknoppen der appelbomen, enz. - De physische verklaring van die kleurenmenging is, dat ons oog ieder lichtpuntje min of meer onscherp afbeeldt (vgl. § 59), en dat de vlekjes van verschillende kleur elkaar overdekken. De schilder past hetzelfde beginsel toe in de pointilleer-techniek.

## 74. Kleurspelingen en weerkaatsingen.

> '*Gij dus, schilder, toon op uw portretten hoe de weerschijn van de kleur der klederen het naburige vlees kleurt*.'
>
> *Lionardo da Vinci, Trattato della Pittura, uitg. Preconi*, 1804, *blz.* 86.
>
> '*Ge wilt een wit lichaam voorstellen dat geheel door lucht omringd is. Het witte heeft geen eigen kleur, het slaat om en verandert in een deel der kleuren die zich er tegenover bevinden. Als ge een vrouw ziet in een wit gewaad, in een open landschap, dan zal zij aan de zonbeschenen zijde zo helder zijn, dat ze de ogen verblindt bijna zoals de zon zelf. Die zijde der vrouw echter waarop de lucht schijnt, vermengd met de zonnestralen die er doorheen geweven zijn, zal blauwachtig lijken. Als zich daarnaast een weide uitstrekt, en de vrouw staat tussen het zonbestraalde gras en de zon zelf, dan zullen de plooien van haar gewaad, waarop het licht der weide valt, door de teruggekaatste stralen de kleur van de weide aannemen*.'
> *Lionardo da Vinci, Trattato, blz.* 16.

## 75. De kleuren van colloïdale metalen, violette ruiten.

In de gevels van oude huizen ziet men soms ruitjes met een mooie, zacht violette tint. Deze tint heeft het glas mettertijd gekregen onder de jarenlange invloed van het zonlicht; men kan dezelfde kleuring in veel korter tijd verkrijgen, als men het glas aan de felle straling van een kwartskwiklamp blootstelt. De kleur is te wijten aan uiterst geringe hoeveelheden mangaan, die in het glas een colloïdale oplossing vormen; de tint hangt daarbij niet alleen af van de optische eigenschappen van het metaal, maar ook van de grootte der deeltjes. - Door verwarming verdwijnt de violette kleur weer.

Faraday vertelt, dat het glas (in zijn tijd) al zeer merkbaar purper werd na 6 maanden bestraling door de zon.[1)]

1) Experim. Res. in chem. phys. p. 142.

## 76. De kleur van lichtbuizen, lichtabsorptie in gassen.

De kleurige lichtreclames die onze grote steden 's avonds omtoveren tot een sprookjesland, zijn glazen buizen, gevuld met een zeer verdund gas, en waar een elektrische ontlading door gaat. Oranje licht geven de buizen met neon; blauw en groen, de buizen met kwikdamp, gemaakt van blauw of groen glas om de verschillende bestanddelen van het kwiklicht te scheiden. Geel licht is heliumontlading in geel glas.

Een merkwaardig

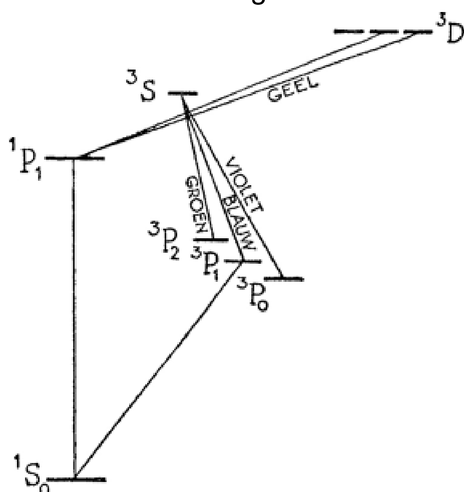



Fig. 83. Elektronenbanen in het kwikatoom, die bij de uitzending van het zichtbare kwikspektrum de hoofdrol spelen.

verschijnsel is waar te nemen aan rechte blauwe lichtbuizen. Stel u zo, dat u zoveel mogelijk in de richting van de buis kijkt; dan merkt u op dat de tint van de buis veranderd is, meer *blauwviolet*, terwijl zij loodrecht daarop veeleer *blauwgroen* is. - Verklaring: het kwiklicht dat doorgelaten wordt door het glas van de buis, bestaat voornamelijk uit drie stralingen: een violette, een blauwe, en een groene, waarvan de eerste slechts een geringe helderheid heeft. Zoals ze uitgestraald worden door een dun laagje maken ze samen de indruk van blauwgroen op ons oog. Maar kijken we door een zeer dikke laag, bv. in de lengterichting ener lange buis, dan moet het licht van de achterste delen een lange weg door de damp doorlopen eer het ons oog bereikt. Op die weg nu wordt het groene kwiklicht veel sterker opgeslorpt dan het blauwe, zodat nu de mengverhouding der stralingen een heel andere wordt en de tint omslaat.

> Inderdaad vormen de groene, blauwe en violette kwiklijnen samen een triplet $^3P^3S$ (fig. 83); juist de groene en violette lijnen gaan naar ‘metastabiele niveaus’ $^3P_2$ en $^3P_0$, vanwaar het elektron moeilijk naar lagere toestanden kan overgaan: het aantal atomen die hun elektron in zulke niveaus hebben is dus altijd abnormaal groot en de absorptie extra sterk.

Evenzo zien er de groene buizen in de lengte geelachtiger uit. Ook hier zijn twee stralingen vooral werkzaam, de groene en de gele kwiklijnen; en ook hier bewijst onze waarneming dat de groene sterker geabsorbeerd wordt.

## 77. Het verschijnsel van Purkinje. Kegeltjes en staafjes.

> '*Groen en blauw worden steeds sterker in de halve schaduwen, geel en rood en wit in de lichten.*'
> *Lionardo da Vinci, Trattato, uitg. v. Seidlitz, blz.* 609.

Zie hoe in dit perk geraniums de bloemen helderrood vlammen op de donkergroene achtergrond van de bladeren. Maar als de schemering komt en de avond, is het duidelijk omgekeerd: nu lijken de bloemen veel donkerder dan de bladeren. Misschien vraagt u zich af, of de helderheid van een rode kleur wel vergelijkbaar is met de helderheid van een groene kleur; maar de verschillen zijn zo sprekend dat men hier althans niet kan twijfelen.

Zoek in een schilderijenmuseum een rood en een blauw die er in de dag 'even helder' uitzien; bij schemering is het blauw veel helderder geworden, het lijkt wel alsof het licht uitstraalde.

Dit zijn voorbeelden van *het verschijnsel van Purkinje*. Het ontstaat doordat ons oog bij normale belichting waarneemt met de *kegeltjes*, bij zeer zwakke belichting met de *staafjes*. De eerste zijn het gevoeligst voor geel, de tweede voor groenblauw, vandaar dat de helderheidsverhouding van verschillend gekleurde voorwerpen kan omslaan wanneer de sterkte der verlichting verandert.

De staafjes geven ons alleen de indruk van licht, maar niet van kleur. Bij maneschijn is de verlichting zo zwak dat vrijwel alleen de staafjes in werking zijn, en dan nemen wij geen kleuren in het landschap meer waar: we zijn kleurenblind geworden! Nog vollediger is die kleurenblindheid in donkere nachten. (Vgl. § 63).

## 78. De psychologische uitwerking van het landschap, gezien door gekleurde glazen.

Geel:

'het oog verheugt zich, het hart gaat open, het gemoed wordt opgevrolijkt, onmiddellijk waait warmte ons tegemoet'. Vele mensen voelen zich geneigd tot lachen als zij door geel glas kijken.

Blauw:

'vertoont alles in treurig licht.'

Rood:
‘vertoont een helder landschap in een vreselijk licht; dit is de kleur die op de dag van het Laatste Oordeel over aarde en hemel uitgespreid zal zijn.’
Goethe, Farbenlehre I, 1, 769, 784, 798.
Groen:
ziet er zeer onnatuurlijk uit, wellicht omdat groene lucht zo zelden voorkomt.

## 79. Kleuren waarnemen bij gebukt hoofd.

Er is een oud recept onder schilders, om de kleuren van een landschap levendiger, rijker te zien: men draait zich om, zet de benen uit elkaar, en bukt zó diep, tot men tussen zijn benen door kijken kan. Het verhoogde gevoel voor kleur zou samenhangen met de grotere hoeveelheid bloed die naar het hoofd stroomt.

Vaughan Cornish geeft aan dat het al voldoende zou zijn op de zijde te gaan liggen. Hij schrijft dit daaraan toe, dat de bekende overschatting van de vertikale afstanden dan vervalt (§ 110), zodat de tinten schijnbaar groter gradiënten vertonen. Het is de vraag of deze verklaring ook vol te houden is voor het veel sterker effekt bij gebukte houding.

Over de gevoelswaarde der kleuren en tinten in het landschap, zie: Vaughan Cornish, Scenery and the Sense of Sight (Cambridge 1935).

## Nabeelden en kontrastverschijnselen.

### 80. Het voortduren der lichtindrukken.

Terwijl we zelf op de trein zitten, vliegt een andere trein in tegengestelde richting voorbij. Gedurende enkele ogenblikken zien we nu het landschap dwars door de ruitjes van die andere trein, duidelijk, bijna zonder flikkering, alleen wat minder lichtsterk. - De snelheid van een trein is ongeveer 17 m/sec, dus de snelheid der twee treinen t.o.v. elkaar is 34 m/sec. Stel de raampjes volgen op elkaar met tussenruimten die soms 1 meter kunnen bedragen. De beelden worden dus af en toe onderbroken gedurende 0,03 sec, zonder dat we dit merken: de lichtindruk heeft tenminste zolang voortgeduurd.

Evenzo kunnen we dwars door de ruitjes van een trein kijken als we zelf op de grond staan. Of we kunnen het landschap in de ruitjes weerspiegeld zien. Als we maar rustig, vast voor ons uit staren, zien we in beide gevallen de beelden zonder flikkering. In dit geval bedraagt het voortduren der indrukken tenminste 0.06 sec.

Om na te gaan hoe snel licht en duisternis moeten afwisselen, wil de flikkering voor ons oog verdwijnen, zoeken we ergens een lang en hoog hek en lopen er langs; we regelen onze stap zó, dat we de indruk van een gelijkmatige verlichting krijgen, daarbij zorgende altijd naar éénzelfde punt in de verte te staren.

De snelheid waarbij het flikkeren net verdwijnt, hangt af van de helderheidsverhouding tussen ‘licht’ en ‘donker’, alsook van de verhouding tussen belichtingstijd en afschermtijd. In werkelijkheid verdwijnt de lichtindruk niet plotseling, maar neemt hij geleidelijk af. Het proces van het verflauwen en telkens weer opnieuw verschijnen der lichtindrukken in een bioscoop zal dus zeer ingewikkeld zijn.

Een klassiek voorbeeld is dat van de vallende sneeuwvlokken:

> '*de vlokken dichterbij ons lijken sneller te vallen, die op afstand trager; en de nabije schijnen samen te hangen als witte koorden, de verder verwijderde echter zien we nietsamenhangend.*'
> *Lionardo da Vinci, Trattato, uitg.* 1804, *blz.* 139.

Regendruppels zien we altijd uitgerekt tot lange, dunne streepjes, want die vallen zoveel sneller dan de sneeuw: ''t regent pijpestelen'.

## 81. Het hekverschijnsel.[1)]

Een snelrollend wiel met spaken, dwars door een hek gezien, vertoont een verrassend patroon: het is alsof al de spaken doorgebogen waren; en merkwaardigerwijze

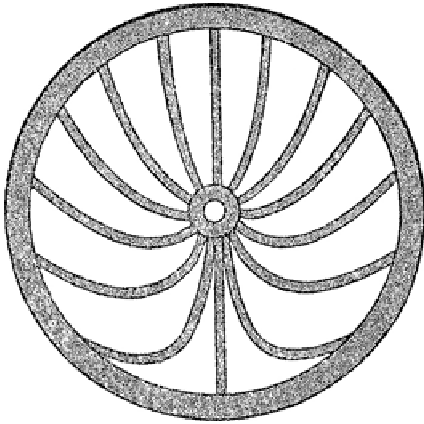


Fig. 84. Het hekverschijnsel: een voortrollend wiel, dwars door een lang hek waargenomen.

is het patroon symmetrisch, en kan men er de draaiingsrichting van het wiel niet aan herkennen (fig. 84). Hoewel het wiel in snelle draaiing en voortbeweging is, staat dit patroon vrijwel stil. Zeer mooi kan men zulke figuren zien aan de grote wielen van een locomotief, als een trein traag het station binnenrijdt en toevallig door een hekgezien wordt. Het verschijnsel treft ons het meest, wanneer de omtrek van het wiel flink verlicht is, de spaken tamelijk donker, en de open tussenruimten van het hek nogal smal. Men ziet het *niet*, als men door een hek kijkt naar een wiel dat om zijn as wentelt, *maar niet vooruitrolt:* de combinatie van draaiing en voortbeweging is onontbeerlijk.

1) P.M. Roget, Philos. Trans. **115**, 131, 1825. - Plateau, Pogg. Ann. **20**, 319, 1830. - L. Burmester, Ber. Akad. München, 142,1914. - Bouasse, Formes et Couleurs, blz. 236 (Paris, 1917). - Pohl, Mechanik, blz. 187, geeft een onjuiste verklaring.

Om het verschijmsel te begrijpen, gaan we uit van het feit *dat de waarnemer het wiel met zijn ogen volgt, en alles wat hij ziet daarop betrekt:* want dit is de voorwaarde waaraan voldaan moet zijn, en die door de hoger aangegeven omstandigheden van verlichting enz. bereikt wordt. Denk u dus het wiel draaiend om een *vaste* as O, maar laat de gleuven van het hek met eenparige beweging vooruitschuiven (fig. 85*a*). Stel dat een bepaalde gleuf een

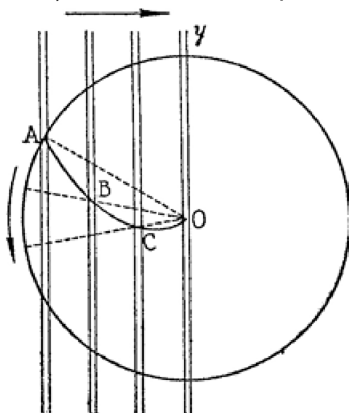



Fig. 85*a*.

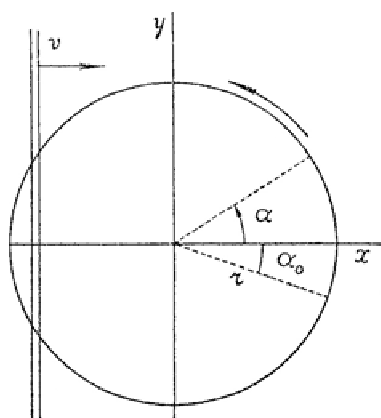



Fig. 85*b*.

bepaalde spaak het eerst ontmoet in A; hij snijdt er een stukje uit, dat zichtbaar wordt. Iets later is de spaak in OB gekomen, de gleuf is nu ook vooruitgeschoven, en ze doorsnijden nu elkaar in B. Nog later is het snijpunt C. En zo wordt de hele kromme ABCO achtereenvolgens beschreven. Elk der krommen waaruit het patroon bestaat is dus de meetkundige plaats van de punten waar wij de doorsnijding van één bepaalde spaak met één bepaalde gleuf achtereenvolgens zien; door het voortduren der gezichtsindrukken lijkt het ons alsof we de gehele kromme tegelijkertijd voor ons oog hadden, mits althans het wiel snel genoeg draait.

Elke volgende spaak, door diezelfde éne gleuf gezien, beschrijft een kromme van dezelfde familie, maar met gewijzigde parameter; we krijgen dus een heel patroon. Indien de volgende gleuf precies de vorige vervangen heeft in dezelfde tijd waarin de ene spaak de volgende vervangen heeft, zal klaarblijkelijk opnieuw dezelfde schaar krommen in dezelfde standen beschreven worden; het gehele patroon staat dan stil. Indien echter de afstand der groeven

een weinig anders is, komt elke spaak iets te vroeg (of te laat) bij de gleuf: elke kromme gaat dus over in een andere, die tot dezelfde schaar behoort welke wij reeds hadden, maar daarin een iets vroeger (of later) nummer inneemt; wij zien dan het gehele patroon langzaam ‘verlopen’, tegen of met de draaiingszin van het wiel naarmate de gleuven iets te dicht of te ver van elkaar staan; maar dit verlopen is geen draaiing van het patroon als geheel, dit blijft voortdurend symmetrisch om de vertikaal. Tenslotte kan het zijn dat de afstand der gleuven zeer veel te groot of te klein is, stel bv. 2 maal te klein; in dit geval ontstaan tweemaal zoveel krommen als er spaken zijn, en het patroon lijkt weer onbewegelijk.

Uit deze redenering ziet men, dat in 't algemeen het geval van een langzaam verlopen het waarschijnlijkste is. Dikwijls is het hek zo kort, dat het gehele verschijnsel zich in een sekunde of minder afspeelt, en dat men nauwelijks tijd heeft om deze bijzonderheid op te merken; ik heb ze echter herhaaldelijk kunnen waarnemen.

Men ziet gemakkelijk in welke de vergelijking der krommenschaar is. Kies de coördinaten zoals in figuur 86*b* aangegeven, en noem *v* de snelheid der gleuven; dan is $x = vt$, $y = x \operatorname{tg} \alpha$. Tengevolge van het verband tussen draaiing en voortbeweging geldt nu:

$$\frac{vt}{r} = \alpha + \alpha_0$$

, dus

$$x = r(\alpha + \alpha_0)$$

. Na elimineren van $\alpha$ komt er:

$$y = x \operatorname{tg}\left(\frac{x}{r} + \alpha_0\right)$$

.

Het blijkt nu inderdaad dat $y$ gelijk blijft indien $\alpha_0$ en $x$ gelijktijdig van teken veranderen: het patroon is symmetrisch t.o.v. de $y$-as.

Ingewikkelder zijn de figuren die ontstaan als men het éne grote wiel van een kar dwars door het andere ziet. Zodra de blikrichting een weinig schuin is, en de wielen elkaar niet meer bedekken, ziet men allermerkwaardigste krommen, die Faraday al heeft opgemerkt, en die hem deden denken aan magnetische krachtlijnen. Zij ontstaan als meetkundige plaats van de punten waar twee spaken elkaar kruisen.

## 82. Flikkerende lichtbronnen.

Van de lichtreclames die 's avonds in onze grote steden zo fantastisch oplaaien, zijn de oranje neonbuizen de meest opvallende. Zij worden met wisselstroom gevoed, de stroom vertoont 50 wisselingen per sekunde, en de lichtsterkte 100, aangezien een

stroomgolf in de ene zowel als in de andere richting een maximum van de lichtsterkte geeft. Deze flikkeringen zijn zo snel dat wij er gewoonlijk niets van merken.

Zwaai echter in het schijnsel der neonbuizen een blinkend voorwerp: u ziet zijn lichtlijnen uitgerekt tot een lichtend vlak, dat een dwarse ribbeling vertoont. Hoe sneller u het voorwerp beweegt, hoe wijder de ribbels van elkaar verwijderd zijn. Uit het aantal ribbels is de frequentie van de wisselstroom te berekenen: als ik met een blinkende schaar 4 maal per sekunde een

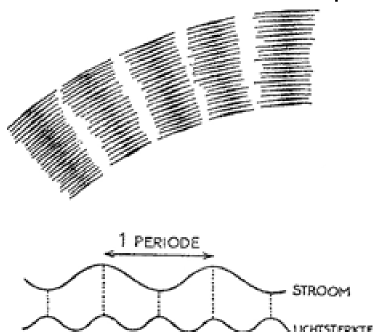



Fig. 86. Het aantonen van snelle flikkeringen in het licht onzer gloeilampen.

cirkeltje beschrijf, en de lichtkring vertoont een 12-tal maxima, dan is de frequentie der stroomstoten 12 × 4 = 48, en de wisselstroom telt 24 periodes per sekunde.

Voor het uitvoeren derproef kan men ook de lichtbron weerspiegelen in een willekeurig spiegeltje, stukje glas of horlogeglas, die men snel heen en weer laat schommelen. Of men kan zijn lorgnet afnemen, vóór het oog houden, en het dan snel een kringetje laten beschrijven (vgl. § 40). - Tenslotte ziet men de flikkeringen ook zonder enig hulpmiddel, als men het oog naar een punt in de buurt van de neonbuis richt, en dan eensklaps naar een andere richting kijkt: het beeld der lichtbron loopt dan over het netvlies, en elk lichtmaximum komt afzonderlijk te voorschijn. Het is merkwaardig hoe moeilijk het is, aldus de blik heen en weer te wenden, terwijl men toch de *aandacht* op de lichtbron concentreert. Soms lukt het, soms niet.

Onderzoek ook gloeilampen die op wisselstroom branden. Bij zwaaien van een zilveren zakpotlood is de ribbeling duidelijk te zien: een bewijs dat de lampedraad bij iedere stroomstoot iets heter en daartussen iets kouder wordt (fig. 86). Brandt de lamp op gelijkstroom, dan is er geen ribbeling.

## 83. Versmeltingsfrequentie voor het centrale en het perifere gezichtsveld.

In streken waar de wisselstroomfrequentie van het lichtnet gering is (20-25 per.), kan men de volgende merkwaardige waarneming doen. Bekijkt men een gloeilamp, dan ziet men ze gelijkmatig licht geven, maar de muur die door de gloeilamp verlicht wordt flikkert. Richt men de blik naar de muur, dan wordt deze rustig, maar men ziet nu de lamp flikkeren.[1)]

Het is duidelijk dat er een verschil moet zijn in het waarnemingsvermogen van ons rechtstreekse en van ons perifere gezichtsveld. Vooreerst zou het kunnen zijn dat de lamp slechts zeer weinig in lichtsterkte schommelt, en dat de drempelwaarde voor het waarnemen van helderheidsverschillen lager is voor het perifere gezichtsveld. Om dit uit te maken, bewegen we bij het licht derzelfde lamp een of ander glinsterend voorwerp in een kringetje rond: we zien nu heel duidelijk de helderheidswisselingen op regelmatige afstanden langs zijn baan, ook als we die scherp aanstaren (vgl. § 82). Het is dus niet, dat ons rechtstreekse gezichtsveld niet gevoelig genoeg is voor kleine helderheidsverschillen, maar dat het de wisselingen *niet snel genoeg volgen kan*.

Die eigenaardigheid van ons oog is ook bij proeven in 't laboratorium te voorschijn gekomen.

## 84. Het stilstaande fietswiel.

Het wiel van een voorbijrijdende fiets ziet er ongeveer uit zoals fig. 87; slechts in het midden, waar de

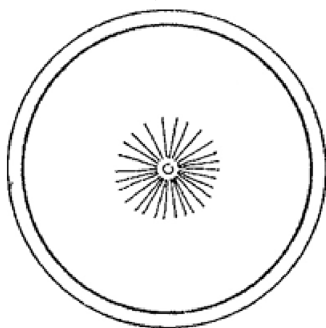


Fig. 87. Hoe we een sneldraaiend fietswiel zien.

spaken langzaam draaien, kunnen we hun beweging voldoende met het oog volgen.

Zet u nu echter in een gemakkelijke houding langs een weg waar veel fietsen voorbijkomen, en tuur scherp naar een vast punt van de weg. Op het ogenblik dat er een fiets aankomt, en dat haar vóórwiel in uw gezichtsveld verschijnt, ziet u ineens een aantal spaken scherp; en zelfs als de fiets *snel* beweegt! Het verschijnsel is zeer treffend, - de kunst is slechts, aldoor in dezelfde richting te blijven kijken, en de aankomende fiets niet met de ogen te volgen.

1) Woog, C.R. **168**, 1222; **169**, 93, 1919.

Verklaring: waar het fietswiel aan de grond raakt, staat de omtrek van het wiel een ogenblik stil, daar hij op dat punt tegen de rustende grond aansluit. Ook de uiteinden der spaken nabij dit punt staan ongeveer stil, terwijl de hoger gelegen punten door de combinatie van draaiing en voortbeweging met grote snelheid in kromme banen worden bewogen. Als we dus maar even de zelfbeheersing hebben de blik in een vaste richting te houden, bv. naar een bepaald punt van de grond gericht, moeten we *de onderste delen* van het wiel min of meer stilstaand zien. Dit komt ook inderdaad uit.

Ik heb de indruk dat we de spaken het duidelijkst zien zolang ze in ons perifere gezichtsveld verschijnen. Het is dus mogelijk dat het vermogen van dit perifere gezichtsveld om snelle lichtwisselingen waar te nemen, hier ook een rol speelt.

## 85. Het stilstaande automobielwiel.[1)]

Zodra een automobiel met enige snelheid voorbijvliegt, is het onmogelijk de spaken van zijn wielen nog te onderscheiden. Op elk bepaald punt van het netvlies zijn de wisselingen van licht en donker zo snel, dat de indrukken in elkaar versmelten; en de spieren van het oog kunnen de blikrichting niet snel genoeg een kegelmantel doen beschrijven om enkele afzonderlijke spaken te volgen.

Nu komt het af en toe voor, dat men de spaken van een voorbijrijdend automobiel één ondeelbaar ogenblik ziet stilstaan, alsof er een momentopname van gemaakt was. Meestal zijn slechts enkele spaken zichtbaar, niet alle, maar andere malen heb ik de indruk dat ik het gehele wiel scherp zie. De verklaring die wij van het stilstaande fietswiel gegeven hebben zou dus niet voldoende zijn. Het verschijnsel is zó opvallend, dat men wel eens beweerd heeft dat het wiel werkelijk af en toe even stil stond, - wat natuurlijk onmogelijk is! Weldra bemerkt men echter, dat het bijna telkens optreedt op het ogenblik dat men een krachtige stap doet en de voet op de grond zet; u krijgt het ook te zien als u een tikje geeft aan uw bril, of een stoot tegen uw hoofd. Blijkbaar voert het oog of de blikrichting dan een zeer snelle, gedempte trilling uit, die toevallig de beweging van sommige spaken precies volgt, zodat hun beeld op het netvlies een heel kort ogenblik onbewegelijk is. Is het de as van de oogbol die een weinig heen en

1) Zs. f.d. phys. u. chem. Unterricht, **42**, 252, 1929.

weer zwaait? Of is het de hele oogbol die in de oogholte schudt (translatorisch)? Kan men aannemen dat het oog bij zulke stootjes ook zeer snelle toevallige draaiingen om de oogas kan uitvoeren?

Een rechtstreeks bewijs voor de hier uiteengezette opvatting krijgt men, als men 's avonds met krachtige, dansende tred loopt, terwijl men de blik scherp turend op een verre lantaren richt. Men ziet dan hoe het lichtpunt bij elke tred een



Fig. 88.

kleine kurve beschrijft in de trant van fig. 88.

Ook als men niet loopt, maar stilstaand naar de auto kijkt, treedt het verschijnsel soms op. In dit geval moet het verklaard worden door plotselinge onbewuste bewegingetjes van het oog. Dat het oog dikwijls op een dergelijke wijze met kleine rukjes beweegt, bemerkt men door *heel even voorzichtig* in de ondergaande zon te kijken: het nabeeld bestaat dan uit een aantal zwarte vlekjes, niet uit een doorlopende band. (vgl. § 88).

## 86. De stilstaande vliegtuigschroef.[1)]

Een luchtreiziger merkte op, dat hij de schroef van zijn vliegtuig kon onderscheiden, niettegenstaande de snelle beweging, wanneer hij de blik ongeveer 45$^{o}$ afwendde en in het perifere gezichtsveld waarnam. Toch draaide de schroef met een snelheid van 28 omwentelingen per sekunde, hetgeen dus 56 flikkeringen betekent. Het 'zien' van de schroef bestaat juist in het waarnemen van deze zeer hoge flikkerfrequentie; en dat dit beter gaat in het perifere dan in het centrale gezichtsveld, is een merkwaardige bevestiging van onze vorige opmerkingen (§ 83).

## 87. Waarnemingen aan een draaiend fietswiel.

Als een fietswiel draait, zien we de spaken meestal niet afzonderlijk, maar uitgewazigd tot een sluier; die sluier is het donkerst bij de naaf, en wordt naar buiten toe lichter. Hetzelfde zien we aan de schaduw van het wiel op een effen fietspad. *Hoe* donker is de schaduw van het wiel? - Wel, elke spaak is 2 mm dik, en de spaken staan gemiddeld 50 mm van elkaar af (aan de omtrek van het wiel); als het wiel draait is elk punt dus in de schaduw gedurende 2:50 = 0,04 van de tijd: dat maakt op ons oog dezelfde indruk alsof de lichtsterkte 0,04 kleiner was dan daarbuiten ('*wet*

1) H.S. Gradle, Science, **68**, 404, 1928.

*van Talbot*). Neem echter in aanmerking, dat de zon niet loodrecht op het wiel schijnt, en dat daardoor de afstand tussen de spaken in het schaduwbeeld kleiner wordt, terwijl de dikte van elke spaak gelijk blijft. Het is dus duidelijk, dat reeds nabij de omtrek van het wiel de schaduw wel 4% tot 8% minder helder zal zijn dan het omgevende vlak, en dat dichter bij de naaf de schaduw wellicht 10% tot 20% zal bedragen. Toch is het moeilijk een helderheidsverschil waar te nemen: de donkere schaduw van de fietsband vormt daarvoor een veel te krachtige scheiding tussen de twee te vergelijken velden; en het verder afnemen van de helderheid naar binnen toe is zo geleidelijk, dat wij er ons niet bewust van worden.

Bij nauwkeuriger waarnemen bemerken we echter meestal een of meer lichte kringen, die zich in de schaduw van het wiel

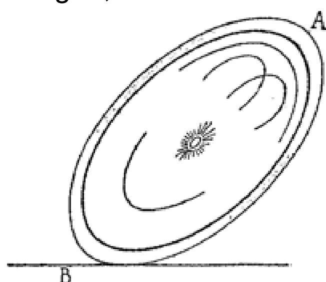



Fig. 89. Licht- of schaduwkurven bij een draaiend fietswiel.

aftekenen (fig. 89); dikwijls zijn het geen gesloten kromme lijnen, maar hebben ze slechts een beperkte lengte. Stap van de fiets af, onderzoek nauwkeurig wáár de lichte boog ontstaat. Het is daar, waar twee spaken elkaar bedekken: op die plaats is het alsof er telkens een spaak minder was, en dus moet inderdaad de gemiddelde schaduwsluier geringer zijn. Wat is het verschil in helderheid gering; en toch, wat ziet ons oog het duidelijk, nu de te vergelijken helderheden vlak naast elkaar voorkomen, en er geen scheidingsstreep tussen is! Het kost enige moeite, zich goed rekenschap te geven van het vlechtwerk der spaken; meestal vormen ze groepjes van 4, die telkens in dezelfde groepering terugkomen. Een doorkruising van 2 spaken beweegt zich langs een bepaalde kromme lijn, die als een licht boogje zichtbaar wordt; na verplaatsing van het wiel over 4 spaakafstanden herhaalt zich de vorming van hetzelfde boogje; wanneer toevallig in elk groepje twee doorkruisingen optreden die elkanders sporen volgen, wordt het lichte boogje bijzonder duidelijk. De helderheid van het boogje zou in 't eerste geval 1% groter zijn dan die zijner omgeving, in het tweede geval 2%; doordat we echter meestal de spaken door de projektie ietwat samengedrongen zien, en doordat het lichte boogje zich meestal niet vlak bij de omtrek van het wiel bevindt, worden die getallen wellicht 3% en 6%. Dit

zijn dus ongeveer de helderheidsverschillen die men nog kan waarnemen als twee velden zonder scheidingslijn netjes aan elkaar grenzen (een ongunstige omstandigheid evenwel is bij deze proeven de ongelijkmatigheid van de weg, die als opvangscherm dient). Die uitkomst klopt aardig met onze vorige schattingen (§ 67).

Geef er u rekenschap van, waarom de lichte bogen en kringen meestal het duidelijkst zijn nabij het smalle uiteinde A van de wielschaduw. Onderzoek, waarom de figuren *niet* gelijk zijn in deel A en in deel B.

Deze zelfde bogen en kringen ziet u nog mooier, als u niet naar de schaduw kijkt, maar rechtstreeks naar het fietswiel van iemand die naast u fietst; want nu tekenen zij zich zonder verwaziging (vgl. § 2) en helemaal scherp af. Tegen een heldere achtergrond lijken de spaken donker,

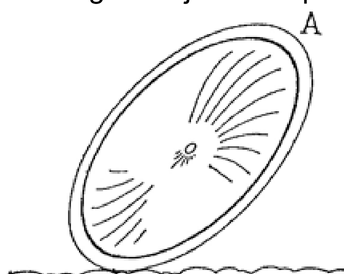



Fig. 90. Eigenaardige kromme lijnen in de schaduw van een fietswiel op een hobbelige klinkerweg.

en dus zien we de kringen helder; als echter het wiel verlicht is door de zon tegen een donkerder achtergrond, zijn de kringen juist donker.

Hiermee zijn de merkwaardigheden van het snel draaiende fietswiel nog geenszins uitgeput! Als u naar de schaduw kijkt, kunt u de scherpe lijnen der spaken af en toe bliksemsnel zien opflitsen, wanneer namelijk uw ogen toevallig een snelle draaiing maakten, zodat uw blik de schaduw net met de goede snelheid volgde (vgl. § 85). Draagt u een bril, of een lorgnet, dan moet u maar even met de hand enkele kleine, snelle verplaatsingen aan de glazen geven, om onmiddellijk de spaken afzonderlijk, op de grappigste manier min of meer met schokjes vooruitgaand te zien. - Maar het allermerkwaardigste is de schaduw als u fietst over een sterk hobbelige klinkerweg: niettegenstaande de ongelijkmatigheid van de achtergrond, onderscheidt u duidelijk een stelsel min of meer radiale maar *kromme* lijnen, bijna altijd in hetzelfde deel van de schaduw; ze verschijnen ook, als u zelf op een effen weg rijdt, maar de schaduw zich op een trottoir van hobbelige klinkers aftekent. Deze onregelmatigheden van het opvangscherm moeten dus een dergelijke rol spelen als de tikjes die we aan onze lorgnetten gaven. Maar waarvandaan de kromming der lijnen? En waarom verschijnen ze altijd

bij voorkeur in hetzelfde gedeelte A van de wielschaduw?

Geheel onafhankelijk van de tot hiertoe beschreven krommen is er nog een bijzondere lichtfiguur, die alleen te zien is als een fiets met *blinkende*, splinternieuwe spaken door het zonlicht beschenen wordt.

## 88. Nabeelden.

*Als de zwervende man, die voor het zinken der zon nog*
*Eénmaal zijn blik naar haar richtte, - reeds daalde zij achter de kimme* -;

*Dan op het donkere bos en op de helling der rotsen*
*Ziet hij zweven haar beeld; waarheen hij keert zijne blikken*
*Snelt het vooruit, en het glanst en trilt in heerlijke kleuren*:
*Zo bewoog zich voor Herman het liefelijk beeld van het meisje....*
*Goethe, Hermann und Dorothea, VIIe gezang*.

Voorzichtig waarnemen! Het oog niet teveel vermoeien! Niet meer dan één of twee proeven achtereenvolgens!

Kijk één ogenblik voorzichtig naar de ondergaande zon en sluit de ogen.[1] Het nabeeld bestaat uit verschillende kleine ronde schijfjes: een bewijs dat het oog met snelle rukjes bewogen heeft in de korte tijd van uw blik. De schijfjes zijn opvallend klein, want door de felheid van de zon zijn we gewoon haar veel groter te 'zien' dan ze in werkelijkheid is: de nabeeldjes laten ons haar ware afmeting zien.

Open het oog weer: u ziet de nabeeldjes overal waarheen u de blik richt. Zulk een nabeeldje lijkt des te groter naarmate u het op verder verwijderde voorwerpen projekteert. Natuurlijk is het altijd gelijk *in hoekmaat*; maar als u een voorwerp ver weg weet, en het toch onder dezelfde hoek ziet als een ander dat dichtbij is, besluit u onbewust op grond van dagelijkse ervaring, dat het verre voorwerp in werkelijkheid het grootste moet zijn.

Op een donkere achtergrond is het nabeeld helder (*positief nabeeld*); dit ziet men goed als men de ogen sluit, en - omdat de oogleden doorschijnend zijn - nog de hand ervoor houdt. Daarentegen wordt op een heldere achtergrond het nabeeld donker (*negatief nabeeld*).

Blijkbaar heeft het felle licht ons netvlies plaatselijk geprikkeld, en blijft de indruk voortduren; maar tevens is dat gedeelte van het

1) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 21-22. Titchener, Experimental Psychology, I, 1, 29 en I, 2, 47.

netvlies ongevoeliger geworden voor het opvangen van nieuwe lichtindrukken.

*Ik staarde in de groote, roode zon*
*Zoo strak, zoo diep ik kon*;
*En overal waar ik nu keek*,
*Zag ik zonnen, vaal en bleek*.

*Er danste uit ieder ding*
*Een donkere, dreigende kring*,
*Op den grond, op de muur, op de lucht*,
*Een weemlende zonnenvlucht*.

*Ze spritsten uit mijn oog*
*En bleven op mijn hart*.
*De laatste die ik zag, hing hoog*
*En zwart*.

*René de Clercq, De Noodhoorn*.

Bij zwakkere lichtbronnen dan de zon zijn de nabeelden ook veel minder sterk. Reeds na enkele sekunden of onderdelen van een sekunde is dan de prikkeling van het netvlies zeer verzwakt, en alleen de vermoeienis blijft over, zodat men alleen nog het omgekeerde nabeeld tegen een heldere achtergrond kanwaarnemen.

Het omslaan van wit in zwart komt bij gekleurde lichtbronnen overeen met het omslaan van het nabeeld in de *aanvullende kleur* ('complementaire kleur'). Rood slaat dus om in groenblauw, oranje in blauw, geel in violet, groen in purper; en omgekeerd.

De mooiste nabeelden ziet men in de schemering; al Goethe's typische voorbeelden van nabeelden zijn 's avonds waargenomen. Dan is het oog goed uitgerust, en de tegenstelling tussen het lichte Westen en het donkere Oosten bereikt een hoogtepunt.

'Toen ik 's avonds in een herberg binnenging, kwam een flink meisje met verblindend wit gezicht, zwart haar en een scharlakenrood keurslijf mij in de kamer tegemoet; ik keek haar in de halve schemering scherp aan, terwijl ze op enige afstand voor mij stond. Toen ze een ogenblik later wegging, zag ik op de witte muur tegenover mij een zwart gezicht, omgeven door een heldere schijn, en was de kleding der zeer duidelijke figuur mooi zeegroen.'[1)]

Personen die een half uur lang in de oranjegele vlammen van een brand gestaard hadden, zagen de maan *blauw* opgaan.[2)]

1) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 52.
2) Cassell, Sports and Pastimes, blz. 405. (London).

Nadat men bij een nachtelijk onweder een felle bliksem heeft gezien, kan men soms het nabeeld als een zwart slangelijntje waarnemen tegen de achtergrond van een verlichte witte muur of van de zwak diffuus verlichte hemel.[1)]

Als men aan het strand bij invallende duisternis in de verte tuurt en de gezichteinder afzoekt, komt er een ogenblik waarop men eigenlijk het onderscheid tussen de helderder lucht en de donkerder zee niet meer kan waarnemen. Blijkbaar werkt een lichtprikkel des te zwakker op het oog, naarmate hij langer geduurd heeft: het netvlies wordt vermoeid. Dat dit inderdaad zo is blijkt, zodra we de blik iets hoger richten: daar verschijnt tegen de hemel het (negatieve) nabeeld van de zee als een lichte strook. Laten we integendeel de blik iets dalen, dan zien we het donkere nabeeld van de hemel tegen de zee.[2)]

## 89. Het verschijnsel van Elisabeth Linné.[3)]

Elisabeth Linné, de dochter van den beroemden plantkundige, bemerkte op een avond dat de oranje bloemen van de Oost-Indische kers (Tropaeolum majus) licht uitzonden. Men dacht aan een electrisch verschijnsel. Darwin bevestigde de waarneming voor een Zuid-Afrikaanse soort lelie. Haggrén, Dowden, en andere oudere onderzoekers vinden hetzelfde, altijd in de ochtend- en avondschemering. Canon Russell herhaalt de waarnemig bij de goudsbloem (Calendula officinalis) en bij het essenkruid (Dictamus fraxinella; in 't Nederlands ook: ‘vuurwerkplant’.), en merkt op dat sommige mensen het sterker dan andere zien.

En toch schijnt het gehele ‘verschijnsel’, waarover indertijd een gehele reeks verhandelingen verschenen is, eenvoudig aan nabeelden toe te schrijven te zijn! Goethe zag nabeelden als hij scherp naar felgekleurde bloemen keek en dan naar de zandweg: de pioen (Paeonia), de oosterse papaver (Papaver orientale), de goudsbloem, gele crocusjes gaven mooie groene, blauwe, violette nabeelden.[4)] Dat was vooral zó in de schemering, en het vlam-achtig oplichten was alleen zichtbaar als men even opzij keek: allemaal omstandigheden die men van nabeelden kan verwachten.

1) Nat. **60**, 341, 1905.
2) Helmholtz, Physiol. Optik, 3e uitg. **2**, 202.
3) Vgl. De Natuur, 1900.
4) Goethe, Farbenlehre, I, 1, 54. - Gesprekken met Eckermann.

Iemand die het verschijnsel duidelijk meent te zien, zou eens felgekleurde papieren bloemen naast de werkelijke moeten plaatsen, en kijken of die ook het lichtverschijnsel geven.

## 90. Kleurveranderingen van de nabeelden.

De nabeelden verzwakken verschillend snel voor de verschillende kleuren, voornamelijk als de lichtindruk zeer sterk geweest is. Vandaar dat de zon en felle, witte voorwerpen toch gekleurde nabeelden kunnen geven. Meestal ziet men het nabeeld (op donkere grond) eerst groenblauw worden, en daarna purperkleurig.

'Tegen de avond bevond ik mij in een smids, toen men juist de gloeiende klomp ijzer onder de hamer bracht. Ik had er scherp naar gekeken, keerde mij om, en keek toevallig in een openstaande kolenschuur. Een ontzaglijk purperkleurig beeld zweefde nu voor mijn ogen, en als ik de blik van de donkere opening naar de heldere plankenbetimmering keerde, scheen mij het verschijnsel half groen, half purperkleurig, naarmate het een donkerder of een helderder achtergrond had.[1)]'

Als men een tijdje gekeken heeft op zonbeschenen sneeuw, of gelezen in een boek waarop de zon schijnt, lijken alle heldere voorwerpen om ons heen purper van kleur, terwijl alle donkere mooi groen worden. Ook hier is het nabeeld op heldere grond het complementaire van dat op donkere grond. Sommige waarnemers spreken van 'bloedrood' in plaats van purper.[2)]

Hier komt nog een andere faktor tussen: het zonlicht schijnt meestal niet alleen *in* ons oog, maar ook *op* ons oog; dit laatste gedeelte dringt gedeeltelijk binnen, dwars door de oogleden en de oogwand, en wordt daarbij bloedrood gekleurd. Ons gehele gezichtsveld wordt door die algemene rode verlichting gevuld; we zien die duidelijk op de donkere partijen, zwarte letters lijken bv. rood. Komen we nu in het getemperde licht van de schaduw, of binnenshuis, dan blijft ons netvlies nog een tijdje vermoeid voor rood licht: wij zien nu alle heldere partijen groen.

Voor den waarnemer die geen bijzondere voorzorgen neemt, zullen het gekleurde nabeeld van het witte licht (dat door de pupil ging) en de vermoeienis voor het rode licht (dat door de oogwand ging) op wisselvallige wijze samenwerken.

Goethe zag zwarte letters rood in het avondlicht[3)]; en evenzo

1) Goethe, Fabenlehre, I, 1, § 44.
2) Nat. **70**.
3) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 46.

Guido Gezelle als hij zijn brevier las, terwijl deze ook opmerkte dat rode letters hem groen leken.

*'k En kan 't niet meer bezien bijkans,*
*mijne oogen willen dolen*;
*'t is vermiljoen*,
*dat zwart in mijnen boek gedrukt*,
*zoo zwart is als de kolen*,
*en 't rood is groen*.

*G. Gezelle, Laatste Verzen*. ('*De Dageraad*').

## 91. Kontrastzoom door 'gelijktijdige tegenstelling.'

Donkere huizenrijen met de lichte hemel als achtergrond schijnen omzoomd door een heldere rand; vooral 's avonds is dit zeer duidelijk (Plaat VII*a*). Men kan dit verklaren door aan te nemen dat het oog kleine onwillekeurige bewegingen maakt, en dat de (heldere) nabeelden van het huis de naburige hemel zullen bedekken en lichter maken. Deze verklaring geldt echter stellig maar voor een klein gedeelte van het effekt. Een belangrijker rol speelt de gevoeligheidsvermindering van het netvlies in de buurt van een belicht gedeelte (§ 72).

'Ik zat eens op het veld en sprak met een man die op enige afstand vóór mij stond, en die zich tegen de achtergrond der grijze lucht aftekende; nadat ik hem lang had aangekeken, scherp en vast, wendde ik de blik een weinig af, en daar zag ik zijn hoofd door een verblindende lichtschijn omgeven.'[1)]

Pater Beccaria deed proeven met een vlieger; men zag een helder glanzend wolkje om de vlieger en om een deel van het koord. Als de vlieger zich ineens sneller bewoog, scheen het wolkje op de vroegere plaats even heen en weer te zweven.[1)]

Een zeer treffend voorbeeld van optische tegenstelling heeft men in onze golvende heidelandschappen, waarvan de achtereenvolgende terreinplooien door luchtperspektief lichter en lichter worden, en zich tenslotte verliezen in de wazige verte (Plaat VII*b*). Iedere rug lijkt donkerder aan de bovenkant dan aan de basis, het effekt is zo overtuigend dat niemand zich aan die indruk onttrekken kan. En toch is dit slechts een begoocheling: het ontstaat, doordat elke bepaalde heuvelrug aan de bovenzijde grenst aan een lichtere strook, beneden aan een donkerder strook. Ten bewijze schermt men met een stuk papier (gestippeld in Plaat VII*b*) de bovenkant van het landschap af: dit is al voldoende om het tegenstellingseffekt te doen verdwijnen.

1) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 30.
1) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 30.

## 92. Kontrastzomen aan de grens van schaduwen.[1]

Iedereen weet dat een stuk karton, in de zon gehouden, een schaduw geeft op een scherm, en dat er tussen licht en schaduw een *halfschaduw* is, die door de eindige grootte van de zonneschijf ontstaat (§ 2). Maar wist u dat die halfschaduw *een lichte rand* heeft, een lichte rand aan de overgang van licht naar halfschaduw?

Doe de proef als de zon al wat laag staat en niet te fel meer is, en houd het scherm ongeveer 4 m achter het karton; beweeg het scherm een weinig

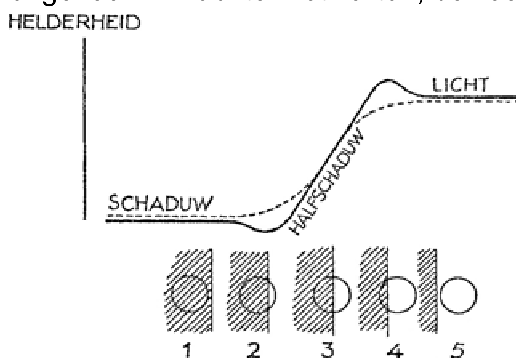



Fig. 93. Kontrastzomen aan de grens van een schaduw.
......... ware helderheidsverdeling
----- schijnbare helderheidsverdeling

om plaatselijke ongelijkmatigheden te vermijden. Het effekt is zeer duidelijk, de waargenomen lichtverdeling is voorgesteld in fig. 93.

Is dit te begrijpen? We verwachten de volgende lichtverdeling: de opeenvolgende punten 1, 2, 3, .... van het opvangscherm zien de zonneschijf toenemend afgedekt door het karton; hun helderheid is evenredig met het niet afgedekte stuk, en moet dus verlopen volgens de gestippelde kromme van fig. 93. *De heldere zoom kan er niet zijn, hij moet door gezichtsbedrog ontstaan*.

Inderdaad zijn daarvoor alle omstandigheden gunstig. Mach heeft laten zien dat men overal contrastbanden ziet waar de helderheid van een tafereel niet lineair verloopt, dus: waar de helderheidskurve gekromd is. De kontrastband vertoont zich altijd als een schijnbare overdrijving van de kromming. En dat dit zo is, kan men wel begrijpen op grond van de opvatting, dat het oog voortdurend kleine bewegingen maakt, ofwel door de verminderde gevoeligheid van het netvlies in de omgeving van belichte velden.

1) K. Groes-Petersen, A.N. **196**, 293, 1913.

Ook de voorbeelden, besproken in § 91, passen geheel en al bij de theorie van Mach; wij moeten slechts een knik in de helderheidskromme als een sterke kromming opvatten.

Tenslotte komt er af en toe een zeer bijzondere gelegenheid om de theorie te toetsen, n.l. gedurende een gedeeltelijke zonsverduistering. Al naar gelang van de mate waarin de zon door de maan wordt afgeschermd en van de oriëntering van het schaduwwerpend karton krijgt men nu bij het herhalen van onze proef verschillende ongewone lichtverdelingen aan de halfschaduwrand. Elk dezer lichtverdelingen vertoont weer zijn (schijnbare) kontrastbanden, en men kan in elk der gevallen nagaan dat aan de wet van Mach voldaan is. Het is niet te verwonderen dat de schaduwen er zo ongewoon uitzien, dat zelfs de onvoorbereide waarnemer erdoor getroffen wordt (vgl. § 3).

## 93. Zwarte sneeuw.

Kijk naar de sneeuwvlokken die uit een grijze lucht neerdwarrelen. Tegen de achtergrond van de lucht lijken de vlokken bepaald zwart! Men moet niet vergeten dat zwart, grijs en wit slechts door de lichtsterkte verschillen, en dat de omgeving daarvoor de vergelijkingsschaal levert. Hier is het de hemel die als maatstaf dient, en die hemel is veel helderder dan men zo zou denken, in ieder geval veel helderder dan de onderkant van een vallende sneeuwvlok. Het verschijnsel wordt al door Aristoteles vermeld.

## 94. Witte sneeuw en grauwe lucht.[1)]

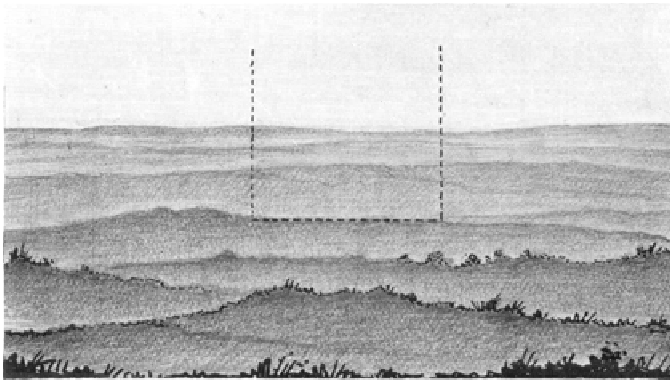
Bij een gelijkmatig bedekte, grijze lucht lijkt de besneeuwde aarde veel helderder dan de hemel. En toch is dat klaarblijkelijk onjuist, want het is diezelfde hemel die de aarde verlicht, en het verlichte objekt kan nooit een groter oppervlakte-helderheid dan de lichtbron hebben. De fotometer toont ook op overtuigende wijze de grotere helderheid van de lucht aan. Neem een spiegeltje en breng het spiegelbeeld der heldere lucht naast het beeld van de sneeuw: de sneeuw lijkt nu inderdaad grijs t.o.v. de witte lucht. (U moet deze proef beslist nemen: ze is even overtuigend als verrassend!).

En *toch* blijven we de illusie behouden, ook al weten we dat het

1) J.O.S.A. **11**, 133, 1925.



PLAAT VII.
Kontrastzoom langs de dakenlijn der huizen in de avond.



Kontrastverschijnselen bij het waarnemen van een golvend heidelandschap.
De begoocheling verdwijnt als men een deel van het landschap volgens de stippellijn afschermt.

eigenlijk anders is! De tegenstelling tussen de sneeuw en de veel donkerder bossen of struiken of huizen is hier wel de bepalende faktor.

Evenzo kan een witte muur op een betrokken dag helderder schijnen dan de hemel.

Foto's en schilderijen die niet met de gezichtsbegoocheling stroken, maken een beslist onnatuurlijke indruk!

## 95. Kleurkontrast.

In allerlei gevallen waarin een bepaalde kleur in de omgeving van het oog een overheersende rol speelt, ziet men dat daarnaast de complementaire kleur versterkt wordt. Het schijnt soms mogelijk, zulke gevallen te verklaren op dezelfde wijze als de kontrastzoom: door de onwillekeurige bewegingen die het oog voortdurend uitvoert; of doordat delen van het netvlies die de algemene overheersende kleur hebben opgevangen, de omringende delen ongevoeliger daarvoor maken. Maar andere malen ontstaat het kleurkontrast door een beoordelingsfout, daar wij de neiging hebben de algemene kleur van het gezichtsveld als min of meer wit te beschouwen; dit komt dan op hetzelfde neer, alsof het oog voor de complementaire kleur gevoeliger was geworden, zodat deze frisser en verzadigder lijkt (Vergelijk hiermee de neiging om het overheersende veld als in rust en horizontaalvertikaal aan te nemen: § 99-102).

Op een binnenplein, met grijze kalkstenen geplaveid, scheen het grasplein oneindig mooi groen op het ogenblik dat de avondwolken het plaveisel purperrood kleurden.[1)]

Voor iemand die bij matig heldere lucht door de weilanden wandelt en niets dan groen ziet, lijken de boomstammen en de aardewegen roodachtig.[1)]

Een grijs huis, gezien door groene jaloezieën heen, schijnt roodachtig.[2)] Als de golven der zee mooi groen zijn, lijken hun beschaduwde delen purperachtig (vgl. § 212, 216).[2)]

Is uw omgeving verlicht door petroleumlampen, kaarsen, vleermuisbranders, die een roodachtig licht verspreiden, dan lijkt het licht van booglampen of van de maan groenachtig blauw. Dit is vooral treffend als de lichtbronnen niet te fel zijn, bv. als men tegelijk de maan en de gasvlammen in het water weerspiegeld ziet.

1) Goethe, Farbenlehre, I, § 59.
1) Goethe, Farbenlehre, I, § 59.
2) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 57.
2) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 57.

'En de blauwe stralen van de Maan schenen met bovenaardse glans over de gloed der toortsen en de vlammen van brand en oorlog.'
(D. Merezjkowski, The Forerunner, X, hoofdstuk 8)

Waar enkele zonnestralen door het groene lover van het bos dringen, en de grond treffen, lijken ze ons lichtrose ten opzicht van de algemene groene kleur der omgeving.[1)]

'Zwarte kleren doen het gelaat blanker schijnen dan het is, witte kleren doen het donkerder schijnen, gele vertonen het meer gekleurd, rode vertonen het bleker.'[2)]

Het kleurcontrast doet zich het sterkst voor, als de velden niet veel in helderheid verschillen. Wat er bij groot intensiteitsverschil gebeurt zien we prachtig in de avondschemering, als de huizenrijen zich donker aftekenen tegen de vlammend oranje westerhemel. Van op enige afstand ziet men alleen de donkere silhouetten, en geen detail noch helderheidsverschillen meer in hun gevels. Ook de takken der bomen en de bladeren tekenen zich af als donker fluweel, hun eigen kleuren zijn verdwenen (vgl. § 220); en dat is niet omdat de belichting op zichzelf te gering is, want op ditzelfde ogenblik zijn bv. alle bijzonderheden op de grond heel goed zichtbaar met hun eigen kleur.

Na een wandeling van enkele uren door een sneeuwlandschap, waarbij we alleen wit en grijs hebben gezien, maken frisse kleuren op ons de indruk van bijzonder verzadigd en warm van tint. Onze ogen waren 'uitgerust voor kleur'[3)].

'Overigens zullen deze verschijnselen zich overal vertonen, als men er op let, zó zelfs dat men het hinderlijk gaat vinden.'[4)]

## 96. Gekleurde schaduwen.

Als we een potlood loodrecht op een blad papier houden, aan de ene zijde beschenen door een kaars, aan de andere door maanlicht, vertonen de twee schaduwen een treffend kleurverschil: de eerste is blauwachtig, de tweede geelachtig.[5)]

Nu is er een *physisch* kleurverschil tussen de twee schaduwen: want op de plaats van de ene schaduw wordt het papier alleen

1) Helmholtz, Optisches über Malerei, blz. 125 (Pop. Vorträge und Reden).
2) Lionardo da Vinci, Trattato, blz. 146 (uitg. 1804).
3) E. Schrödinger in Müller-Pouillet, Lehrb. d. Physik, II, 534, 1926.
4) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 57.
5) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 75.

beschenen door de maan; op de plaats van de andere, alleen door de kaars; en het licht van de maan is witter dan dat van de kaars. Maar blauw is het in geen geval! Het werkelijke kleurverschil der twee schaduwen wordt dus klaarblijkelijk versterkt en gewijzigd door *physiologische* kontrastwerking.

Evenzo zien we 's avonds het kleurverschil tussen onze eigen schaduwen, als de volle maan ons van de éne zijde beschijnt, een straatlantaren van de andere zijde.

Hoe betrekkelijk de 'oranje' kleur van de gloeilamp echter is, blijkt ons heel goed als wij ze vergelijken kunnen met een der moderne natriumlampen, bijvoorbeeld in stations en op pleinen die een gemengde verlichting hebben (voorbeeld: station Den Bosch). De natriumlamp werpt een mooi blauwe schaduw, de gloeilamp een oranje! Zodra we in een gedeelte zijn dat alleen door de natriumlampen verlicht wordt, lijkt onze schaduw zwart; komen we al wandelend in de buurt van gewoon gloeilampenlicht, dan zien we de schaduw ineens blauw worden. Omgekeerd zien we de zwarte schaduw die de gloeilamp veroorzaakt naar oranje omslaan, zodra we een natriumlamp naderen. Klaarblijkelijk past het oog zich aan zijn omgeving aan, en heeft neiging om het daar overheersende licht 'wit' te noemen; alles wat er dan bijkomt wordt ten opzichte van dit 'wit' beoordeeld.

Goethe zegt, dat de schaduwen van kanariegele voorwerpen violet zijn. Dit is zeker physisch onjuist; maar door physiologisch kontrastverschijnsel kàn het zo schijnen, als bv. de waarnemer de belichte zijde van die gele voorwerpen ziet, zodat de gehele omgeving der schaduw voor hem felgeel is.

Men kan zich afvragen waarom de schaduwen die de zon midden op de dag doet ontstaan, zo goed als niet gekleurd zijn, terwijl de blauwe lucht toch zo sterk verschilt van de kleur van het zonlicht. Het antwoord is, dat de tegenstelling van de helderheden tussen schaduw en licht te aanzienlijk is. Laat echter het scherm waarop u de schaduw opvangt zò sterk hellen dat de zonnestralen het bijna rakelings treffen: het kleurkontrast wordt nu veel duidelijker.

Klassiek is het geval van de schaduwen op de sneeuw, waarvan de kleur zo bijzonder zuiver te voorschijn komt. Ze zijn blauw, omdat ze alleen het licht van de blauwe lucht krijgen, ze zijn zelfs even blauw als de blauwe lucht zelf. En wij moesten ze nòg blauwer zien tegenover hun door de zon geelachtig getinte omgeving. Maar die kleur valt veel minder op dan men zou verwachten, tengevolge van het grote helderheidsverschil. Let echter op de schaduwen wanneer de zon over een sneeuwlandschap ondergaat:

vooral de laatste minuten vóór zonsondergang, naarmate zij oranje, rood, purper wordt, kleuren zich de schaduwen blauw, groen, groengeel.[1] Deze tinten worden zo sterk, omdat de helderheden in en naast de schaduw nu veel minder verschillen dan in de dag: de zonnestralen treffen de sneeuw onder zeer kleine hoeken, het diffuse licht van de hemel krijgt relatief een veel groter belang. Daarenboven kleurt de zon zich sterker en sterker.

'Op een reis door de Harz in de winter daalde ik tegen de avond van de Brocken neer; de witte vlakten boven mij en beneden mij waren besneeuwd, de heide was met sneeuw bedekt, alle verspreid staande bomen en vooruitspringende klippen, alle boomgroepen en rotsmassa's waren geheel berijpt; de zon daalde juist over de Oder-vijvers. Waren bij dag reeds zwak violette schaduwen op te merken in de geelachtige tint van de sneeuw, nu dat een sterker geel de belichte plaatsen kleurde moest men de schaduwen wel felblauw noemen. Toen echter de zon eindelijk zou ondergaan, en haar door de dampkring getemperd licht de gehele wereld om mij heen met het prachtigste purper kleurde, zag men de tint der schaduwen in een groen overgaan, dat in klaarheid met het groen der zee, in schoonheid met dat van een smaragd te vergelijken was. Het verschijnsel werd steeds levendiger, men waande zich in een sprookjeswereld, want alles had zich met de twee levendige en zo mooi bij elkaar passende kleuren overdekt; tot tenslotte bij zonsondergang het prachtige tafereel in een grijze schemering en in een heldere nacht met maan en sterren overging.'[2]

Aan het verschijnsel der gekleurde schaduwen op sneeuw is er ook een merkwaardige psychologische zijde.[3] Bij blauwe lucht, bij dag worden de schaduwen veel verzadigder blauw gezien, *als men niet weet dat het sneeuw is*; men kan een beschaduwde sneeuwvlek in de verte evengoed zien als 'witte sneeuw in de schaduw' of als 'een blauw meer.' Vandaar dat op het matglas van een camera de sneeuwschaduwen veel blauwer lijken dan in 't landschap, omdat men ze niet ineens herkent. Een waarnemer, die van uit een donker, dicht sparrebos naar rijp keek die de struiken in de verte bedekte, was blijkbaar onbevoordeeld; het was precies alsof hij door een buis keek met een gaatje aan het einde (§ 174) .... en hij zag de rijp inderdaad blauw![4]

1) Chevreul, C.R. **47**, 196, 1859.
2) Goethe, Farbenlehre, I, 1, 75.
3) I.G. Priest, J.O.S.A. **13**, 308, 1926.
4) Das Wetter, **20**, 69, 1903.

Er is in de Russische letterkunde een allermerkwaardigste beschrijving van ditzelfde verschijnsel zoals het *door kinderen* wordt waargenomen, dus ook door waarnemers die zonder vooropgezette mening kijken. Ik twijfel er geen ogenblik aan of deze beschrijving is aan de werkelijkheid ontleend; maar vermoedelijk waren enkele bijzonderheden anders dan de schrijver ze uit de herinnering heeft opgetekend: de lucht moet blauw geweest zijn, de sneeuw was dus niet aan het vallen, maar lag al op de grond, en wel in de schaduw.

> *'Galja, kijk eens ....! Waarom valt er blauwe sneeuw .... 2 Kijk eens ....! 't is blauw, blauw ....!'*
> *De kinderen wonden zich op en begonnen in blijde verrukking tegen elkaar te schreeuwen*:
> *'Blauw! Blauw ....! blauwe sneeuw ....'*
> *'Wat is er blauw? Waar?'*
> *Ik zag rond om me heen, keek naar de besneeuwde velden, de besneeuwde bergen, en raakte ook opgewonden. Het was iets ongewoons: de sneeuw wentelde en zweefde van alle kanten op ons af - ver weg en heel dicht bij, in blauwe golven. En de kinderen schreeuwden in blijde opwinding:*
> *'Is nu de hemel in stukjes gevallen? Ja, Galja?'*
> *'Blauw, blauw ....!'*
> *En ik werd weer getroffen door de scherpe, poëtische opmerkingsgave van die peuters. Daar liep ik nu met hen, en ik had dat zwevende blauw niet opgemerkt, ik had vele winters meegemaakt, vele malen het genot van de sneeuwval beleefd, en geen enkele keer had ik die onafzienbare azuren kringvlucht van de sneeuw boven de aarde opgemerkt.*
>
> *Fj. Gladkow, Nieuwe Grond. Blz. 161*. (*Amsterd. 1933*)

## 97. Gekleurde schaduwen die door gekleurde lichtreflexen ontstaan.

Gekleurde voorwerpen die door de zon verlicht worden, werpen een lichtschijn om zich heen die dikwijls sterk genoeg is om schaduwen te doen ontstaan, welke dan de complementaire kleur vertonen. Om deze lichteffekten op te sporen, is een zakboekje het ideale instrument: men slaat het open tot een rechte hoek; met de éne zijde van de tweevlakshoek houdt men zonlicht of hemellicht tegen, terwijl men op de andere zijde de gekleurde lichtschijn laat vallen. Het potlood dat bij het zakboekje behoort, dient ons om vóór het papier te houden: zijn schaduw neemt een complementaire kleur aan, en is daardoor een uiterst gevoelig reagens om aan te wijzen dat de invallende lichtschijn getint is.

Een groen geverfde muur, een groene struik geven rose schaduwen. Een gele muur geeft blauwe schaduwen, die nog op 400 meter afstand aangetoond konden worden! Een okerkleurige bergwand deed hetzelfde.[1)]

## 98. Onverklaarde Contrastverschijnselen.

Een waarnemer vertelt,[2)] hoe hij van op zijn schip bij heldere nacht de maan zag, 20° boven de gezichteinder, en hoe haar licht weerspiegeld werd door de golven als een lichte driehoek, die

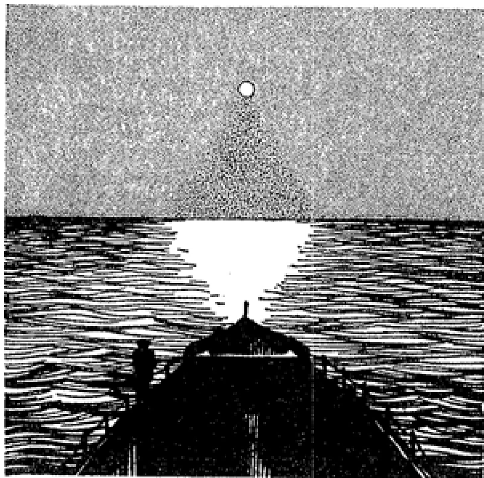


Fig. 94. Een nog onverklaarbaar kontrastverschijnsel.

zich van het schip tot de gezichtseinder uitstrekte (vgl. § 16). Het merkwaardige was nu, dat hij een dergelijke driehoek, maar *omgekeerd*, van de maan tot de horizon zag afdalen. Het effekt was stellig physiologisch en niet echt, want: 1) het trad ook op als de kust bergen vertoonde die bijna tot aan de maan schenen te reiken; 2) het verdween als de onderste lichte driehoek en de maan afgeschermd werden; 3) als men zich omdraaide en ineens

1) C.R. **48**, 1105, 1859.
2) Cl. Martins, C.R. **43**, 763, 1856.

keek, verscheen de begoocheling slechts na enige sekunden; 4) in de donkere driehoek zag men geen sterren meer van de 2e grootte, 'dit gebied van de hemel was dus eigenlijk sterker belicht'(??).

Wie neemt dit eens opnieuw waar en zoekt een behoorlijke verklaring?

Plassmann zegt, dat men bij het herhaaldelijk kijken naar de ondergaande zon deze dikwijls ziet als een rode schijf met een centrale witte vlek.[1)]

Sharpe merkt op, hoe er twee dagen na nieuwe maan een zwakke lichte rand te zien is aan de zijde van de schijf, tegengesteld aan de smalle maansikkel.[2)] Dit moeten natuurlijk kontrastverschijnselen zijn, maar hun juiste verklaring is onbekend.

1) Met. Zs. **48**, 421, 1931.
2) Phil. Mag. **4**, 427. Zie ook J.B.A.A. vol. **28, 29, 45**.

# Het beoordelen van vorm en beweging.

## 99. Gezichtsbedrog omtrent stand en richting.

Stel ons gezichtsveld bestaat uit twee groepen voorwerpen; binnen elke groep zijn die voorwerpen evenwijdig of haaks op elkaar, maar de twee groepen hellen ten opzichte van elkaar: dan zijn we geneigd de ‘overheersende’ groep als werkelijk

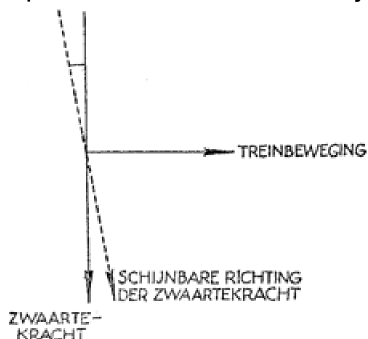



Fig. 95. Schijnbare richtingsverandering van de zwaartekracht bij het remmen van een trein.

vertikaal en werkelijk horizontaal te beschouwen.

Als een trein toevallig in de bocht stilstaat of langzaam rijdt, en de treincoupé dus in de dwarsrichting helt, zie ik alle palen, huizen, torens daarbuiten in de andere zin overhellen. Blijkbaar geef ik er mij wel *enigszins* rekenschap van dat mijn coupé helt, maar lang niet in voldoende mate.

In de gangen van een schip dat helt (bv. als de wind dwars op het schip blaast), lijken mij alle mensen scheef te staan ten opzichte van de loodlijn.

Iets dergelijks speelt ook een rol bij het beoordelen van geringe hellingen, althans voor een fietser.[1] Het terrein waarop ik rijd zie ik altijd ‘te horizontaal’; als ik fietsende van een steile helling afdaal, schijnt het water in een reservoir langs de weg niet horizontaal te staan, maar mij tegemoet te hellen. Bevind ik mij op een zacht dalend stuk, dan lijkt de weg verderop te stijgen - terwijl

1) Bragg, Het Wonder van het Licht, blz. 49.

hij feitelijk vlak is; ik zie de stijging in de verte te sterk en de daling te zwak. Mijn ogen leren mij vooral hoe de helling vóór mij *verandert*; dikwijls zijn hun indrukken tegengesteld aan wat ik uit de tegenstand bij het trappen zou besluiten.

Een eigenaardige begoocheling kunnen we waarnemen als we ons bevinden in een trein die remt. Vestig de aandacht op schoorstenen, huizen, randen van treinraampjes en andere vertikale voorwerpen: op het ogenblik dat de trein sterk vertraagt krijgt u de indruk dat al deze lijnen enigszins voorover hellen, het duidelijkst als de trein net stilstaat; onmiddellijk daarna staan ze ineens weer rechtop. Zelfs de horizontale vlakte van een weiland scheen mee te hellen en is nu weer waterpas geworden. - De verklaring is, dat we ons bij het remmen naar voren voelen gaan, alsof de richting van de zwaartekracht gewijzigd was. Ten opzichte van wat onze spieren nu voelen als 'de vertikaal' hellen de werkelijke voorwerpen voorover (fig. 95).

## 100. Het zien van bewegingen.[1)]

Meestal stelt men zich voor dat bewegingen waargenomen worden, doordat men een voorwerp ten opzichte van vaste merkpunten eerst in een bepaalde stand, daarna in een gewijzigde stand ziet. Dit is echter niet altijd het geval; een *snelheid* kan als een enkelvoudige indruk waargenomen worden, evengoed als een lengte of een tijd. Als u naar de beweging der wolken kijkt, krijgt u onmiddellijk een indruk van hun richting en van hun snelheid.

Men heeft gevonden, dat wij snelheden kunnen waarnemen die niet groter zijn dan 1' of 2' per sekunde; dit is het geval, wanneer we vaste punten in het gezichtsveld hebben (ook al vergelijken we daar niet bewust mee). Zonder vaste punten wordt de waarneming der snelheid ongeveer 10 maal onzekerder; het onbewegelijke vergelijkingsstelsel is in dergelijke gevallen uw eigen oog, waarvan u door uw spieren voelt dat het in rust is, en waarin u met de gezichtszin de beelden over het netvlies voelt schuiven.

> Bekijk de voorbijtrekkende wolken, en tracht hun trekrichting bij het eerste rustige kijken ineens te bepalen. Varieer de omstandigheden: lage wolken, hoge wolken; weinig wind, veel wind; met maan, zonder maan. - Een snelheid van 2' per sekunde betekent dat de wolk in 15 sec. over de maanschijf trekt.

1) Pflüger's Archiv, **39**, 347, 1886; **40**, 459, 1887; en het latere werk van Basler.

Een net met brede mazen is uitgehangen om te drogen. Men ziet duidelijk elke windstoot over het net lopen; maar bekijkt men één der mazen, dan is er nauwelijks beweging te zien. Het oog schijnt erg gevoelig voor kleine bewegingen die in onderling verband geschieden.

## 101. De bewegende sterren.[1)]

Omstreeks 1850 is men groot belang gaan stellen in een geheimzinnig verschijnsel, daarin bestaande, dat een ster die men scherp aankeek soms heen en weer scheen te zwaaien en van plaats te veranderen. Het effekt zou in de schemering optreden, en alleen aan sterren in de buurt van de gezichteinder, minder dan 10$^{o}$ hoog. Men zag de sterk fonkelende ster met rukjes bewegen, evenwijdig aan de horizon, dan 5 tot 6 sekunden blijven staan, evenzo weer achteruit bewegen, enz. Het verschijnsel was voor veel waarnemers zó duidelijk, dat zij het als objektief beschouwden en door slieren warme lucht beproefden te verklaren.[2)]

Er kan echter geen sprake zijn van een natuurkundig verschijnsel. Een beweging van ½$^{o}$ per sekunde voor het ongewapend oog zou overeenkomen met 100$^{o}$ of meer voor een kijker met matige vergroting: de sterren zouden heen en weer zwiepen en door het veld schieten als meteoren. Ieder waarnemer weet dat daar geen sprake van is. Zelfs bij de allerslechtste luchttoestand zijn de plaatsveranderingen tengevolge der scintillatie beneden de grens van wat het oog kan waarnemen. *Psychologisch* behoudt het verschijnsel echter zijn volle belang. Misschien ontstaat het, als er geen vergelijkingsobjekt is ten opzichte waarvan we de stand van de ster goed kunnen waarnemen; wij zijn er ons niet van bewust, dat ons oog voortdurend kleine onwillekeurige bewegingen uitvoert, en moeten dus de verplaatsingen van het beeld over het netvlies wel aan verschuiving van de lichtbron toeschrijven.

Iemand heeft mij eens gevraagd hoe het komt dat een ver verwijderd vliegtuig zich steeds met kleine rukjes vooruitbeweegt, als men het aandachtig bekijkt, Blijkbaar was hier een zelfde psychologische oorzaak in 't spel als bij het ‘bewegen’ der sterren.

1) Pogg. Ann. **92**, 655, 1857. - Nieuwere literatuur over ‘autokinetische gezichtsindrukken’: zie Hdb. der Physik, Bd. 20, Physiologische Optik, blz. 174.
2) A. Müller, Pogg. Ann. **106**, 289, 1859.

De uitdrukking 'ver verwijderd' schijnt er op te wijzen, dat ook dit verschijnsel vooral nabij de gezichteinder optreedt.

Wat moet men ervan denken, dat drie personen, onverwachts en gelijktijdig, de maan op en neer zien dansen gedurende ongeveer 30 minuten?![1)]

## 102. Begoochelingen omtrent rust en beweging.

Een zeer bekende begoocheling ontstaat, als men in een stilstaande trein zit en de trein daarnaast in beweging ziet komen Je meent dan dat het je eigen trein is die heel zachtjes vertrekt. Of we kijken langs een toren of hoge radiomast naar de voorbijtrekkende wolken: weldra lijkt het, alsof de wolken stilstonden maar alsof de toren bewoog. Evenzo zien sommige mensen de maan voorbijsnellen door het stilstaande wolkenzwerk. Als men op een plank over een beek loopt, moet men oppassen niet naar het stromende water te kijken, op straffe van duizeligheid: het oordeel over rust en beweging komt in de war, omdat een zo groot gedeelte van het gezichtsveld beweegt.[2)] - Degene die voor het eerst op zee vaart, ziet de hangende voorwerpen in zijn hut heen en weer schommelen, terwijl de hut zelf stilstaat.

In al deze gevallen is de begoocheling nauw verwant met die van § 99. Volgende algemene regel schijnt te gelden: als we de voorwerpen in ons gezichtsveld verdeeld zien in twee groepen, de ene bewegend, de andere in rust, dan hebben we neiging om de grootste groep als in rust te beschouwen. Merk op dat die begoocheling tenslotte neerkomt op een vergissing betreffende de beweging der spieren van ons oog.

Ik zit bij het raampje van de trein en kijk dromend naar de voorbijvliegende grond. De trein stopt; en terwijl ik zeker weet dat hij stilstaat, heb ik toch bij het naar buiten kijken de onweerstaanbare indruk dat hij langzaam achteruit glijdt. Het is niet zó dat het gehele gezichtsveld even snel verschuift: dicht bij mij is de beweging sneller, op grotere afstand langzamer; zij is ook langzamer op enige afstand rechts en links van het punt naar hetwelk ik tuur. Het is, alsof het gehele landschap langzaam om dit punt draaide, en daarbij uit een lederachtig rekbare stof bestond, die zich vervormt; de draaiingsrichting is de tegengestel-

1) Nat. **38**, 102, 1888.
2) Helmholtz, Physiol. Optik, 3e uitg. **3**, 209 en vlg. - J.J. Oppel, Pogg. Ann. **99**, 540, 1856.

de van die welke gold toen de trein bewoog (§ 107). Het zou aardig zijn, op het ogenblik dat de trein stopt fluks aan het andere raampje te gaan zitten: de beweging zou dan in de oorspronkelijke zin moeten doorgaan.

Men kan zich voorstellen dat onze oogspieren de gewoonte hebben aangenomen, de voorbijvliegende voorwerpen onbewust min of meer te volgen; staat de trein stil, dan gaan we voort met die onwillekeurige oogbewegingen, en blijven nog een tijd lang als 't ware een constante ‘compensatiesnelheid’ bij de werkelijke optellen. De wijze echter waarop de snelheid verandert naar de randen van het gezichtsveld toe, kan nooit door één enkele oogbeweging verklaard worden. Men heeft zelfs proeven genomen, waarbij lange tijd getuurd werd naar voorwerpjes die voortdurend van een middenpunt uit naar buiten bewogen werden, de ene naar boven, de andere naar beneden, naar rechts en naar links: bij stop zetten van de beweging zag de waarnemer de lichtpunten van alle kanten naar het centrum terugstromen, hetgeen toch onmogelijk door een oogbeweging te verklaren is! Het is dus veeleer ‘onze geest’, die in elk deel van het gezichtsveld een deel van de snelheid heeft leren wegredeneren, en daarmee nog doorgaat na het ophouden der beweging.

De waarneming welke wij beschreven hebben treedt ook op, wanneer we een stipje op de ruit van de treincoupé fixeren, en dus de oogbeweging uitschakelen; mits de beweging niet zò snel is, dat de voorwerpen buiten tot strepen ineenvloeien.[1)]

Daartegenover staat nu weer een reeds oude waarneming van Brewster, die wel degelijk op onwillekeurige oogbewegingen wijst.[2)] Als we uit het treinraampje kijken, lijken de steentjes en keitjes tot streepjes uitgerekt; kijk nu snel naar de grond op een iets groter afstand: een heel kort ogenblik ziet u dan even de steentjes in rust, als werden ze verlicht door een electrische vonk. Dit bewijst toch dat ons oog inderdaad de bewegende voorwerpen volgt, maar niet met de volle snelheid.

Brewster deed nog een andere waarneming (t.a.p.), toen hij naar de voorbijvliegende steentjes keek door een spleet in een blad papier. Draaide hij opeens de ogen opzij, zodat hij de steentjes in het indirekte gezichtsveld zag (steeds door de spleet kijkend), dan was het gehele tafereel een kort ogenblik scherp. Verklaring??

1) Von Kries in Helmholtz, 3e uitg., III, 207.
2) Proc. Brit. Ass. 1848, blz. 47.

Ik loop langs een speelterrein voor kinderen, aan mijn rechterhand, afgezet door een zeer lang hek. Al lopende kijk ik naar de kinderen, daarbij voortdurend het hoofd naar rechts gekeerd houdend. Na 1 tot 2 minuten kijk ik weer voor mij uit, en zie nu de straatkeien en andere voorwerpen vóór me van rechts naar links schuiven. Tracht ik de proef te herhalen, maar fixeer ik het hek in plaats van de kinderen, dan is het verschijnsel veel minder opvallend. - Bij dergelijke waarnemingen vindt men, dat men niet altijd de snel bewegende voorwerpen zelf met het oog moet volgen, maar dat het gunstig is naar een voorwerp met weinig struktuur te turen, terwijl beelden met sterke tegenstellingen van licht en donker over het netvlies schuiven.[1)]

Ik kijk aandachtig naar vallende sneeuwvlokken, volg één ervan in zijn val, richt dan snel de blik omhoog en zoek een nieuwe uit; en zo gedurende enige minuten. Werp ik nu mijn ogen op de besneeuwde grond, dan zie ik hem letterlijk oprijzen terwijlik mezelf voel dalen.

Kijk een tijdje naar het water van een snelstromende rivier, of naar de ijsgang der drijvende schotsen, en fixeer hier bij de punt van een ducdalf, of een detail op een eilandje. Als u nu de blik weer op de vaste grond richt, ziet u een 'antistroombeweging'.

Na het bewonderen van een waterval, schijnen de oevers opwaarts te bewegen.

Purkinje keek geruime tijd van uit zijn raam naar een optocht van ruiters; daarna had hij de indruk, alsof de huizenrij aan de overkant in tegengestelde richting bewoog.

Als u langs een smal paadje tussen het koren loopt, en naar de maan in de verte tuurt, zijn de omstandigheden alweer gunstig voor het optreden der begoocheling.

Die omstandigheden zijn, kort samengevat:

de beweging moet tenminste 1 minuut duren;

ze mag niet te snel zijn;

het oog moet turen, hetzij naar een bewegend, hetzij naar een rustend voorwerp, maar altijd zo dat de beelden die over het netvlies trekken enige tegenstellingen en een duidelijke struktuur vertonen.

## 103. De slingerende dubbelsterren.[2)]

Dit is een verschijnsel, reeds door den groten Herschel waargenomen. Kijk met een eenvoudig toneelkijkertje naar de voor-

1) Vgl. Basler, Pflüger's Archiv, **132**, 131, 1910.
2) Hemel en Dampkring, **29**, 348-380-413, 1931.

laatste ster van de Grote Beer. U ziet heel duidelijk dat er naast de heldere ster nog een zwakke zit (fig. 61, 78). Doe nu de proef liefst als die twee sterren min of meer



Fig. 96. Schijnbare slingering van dubbelsterren, door een heen-en-weer bewegend toneelkijkertje waargenomen.

vertikaal onder elkaar zitten (- het gaat anders toch ook -). U beweegt uw kijkertje zachtjes een klein eindje naar links, net zo snel dat u de beide sterren nog als puntjes blijft zien; dan weer naar rechts; dan weer terug naar links, enz. Daarbij schijnt het nu alsof de zwakkere ster telkens iets achterbleef bij de heldere, het lijkt wel alsof ze aan een touwtje hing en een slingerbeweging uitvoerde (fig. 96)!

Het verschijnsel is te verklaren, doordat het licht een zekere tijd nodig heeft om een indruk op ons netvlies te maken. Die tijd is des te korter naarmate de ster helderder is; tegen dat de zwakste gezien wordt is de heldere al een eindje verder.

Ditzelfde verschijnsel is in de laatste jaren door Pulfrich gebruikt om een nieuw type van fotometer te bouwen.

## 104. Gezichtsbedrog bij het beoordelen van de draaiingszin.

Een windmolen draait in de avondschemering. We kijken van uit een richting, schuin op het vlak der wieken, en zien in de verte hun donker silhouet (fig. 97a). U kunt u voorstellen dat de wieken rechtsom draaien, maar evengoed dat ze linksom gaan (fig. 97b). Het overgaan van de éne voorstelling op de andere vereist een ogenblik concentratie van de aandacht; meestal is het ook voldoende, rustig te blijven kijken, dan slaat het beeld ‘vanzelf’ om. - Meteorologische stations hebben meestal een windmeter van Robinson: het is een molentje, dat om een vertikale as draait, en gebruikt wordt om de windsterkte te meten. Als ik het van op afstand rustig blijf aankijken, schijnt de draaiingszin telkens na ongeveer 25 of 30 sekunden om te slaan, zonder dat mijn wil daar bewust aan meewerkt. Ook een windvaan die heen en weer zwaait kan ons aan het twijfelen brengen, vooral indien hij niet te hoog geplaatst is (fig. 97c).

In al deze gevallen hangt ons oordeel over de draaiingszin ervan af, welke delen van de baan we dichter bij ons, en welke we verder van ons af achten. Die waarop toevallig onze aandacht

het meest gevestigd is, lijken ons in 't algemeen dichterbij. Het omslaan van de schijnbare draaiingszin is dus aan een verspringen van de aandacht toe te schrijven.

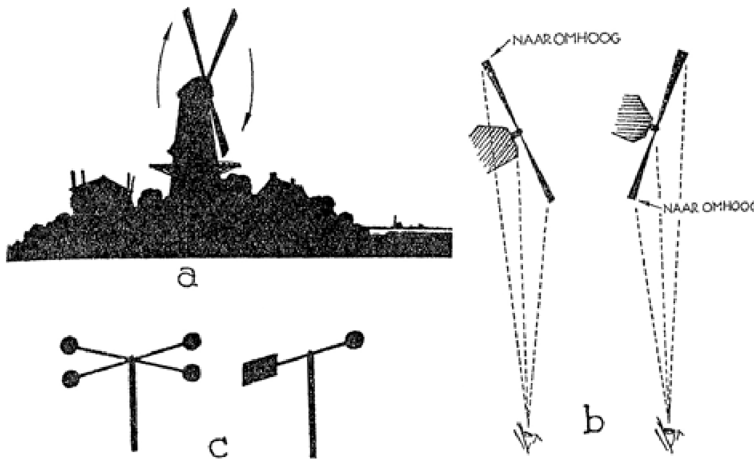



Fig. 97. Het silhouet van de molen in de avond:
*a*. wat de waarnemer ziet; *b*. welke voorstelling hij ermee verbinden kan. *c*. Andere bedriegelijke silhouetten.

## 105. Stereoskopische verschijnselen.

Met slechte treinruitjes, zoals men ze hier en daar wel nog aantreft, kan men een grappig optisch verschijnsel waarnemen. Wacht tot de trein stopt, en kijk aandachtig door de ruit naar de keien van de grond. Ogen dicht bij het glas, hoofd rustig houden, en u vrijmaken van de vooropgezette gedachte dat de grond vlak *is*! U bemerkt nu ineens dat hij lijkt te golven, zelfs heel sterk te golven! Verplaatst men langzaam het hoofd, dan lopen de golvingen in tegengestelde zin over de grond; verwijdert men zich een weinig van de ruit, dan schijnen ze ongeveer even hoog te blijven maar wijder te worden.

Verklaring. Het glas van de ruit is niet vlak, het vertoont heel zwakke hobbels, meestal evenwijdig aan een bepaalde richting, want ze zijn ontstaan door het uitrollen van het gloeiend-vloei-

bare glas onder stalen rollen. Zulk een hobbel werkt als een prisma van geringe brekende hoek en doet de lichtstralen een weinig afwijken. In fig. 98 is aangenomen dat de ogen L, R die naar het punt A van de grond kijken, de invloed van de hobbels in het glas nog niet merken. Bij het waarnemen

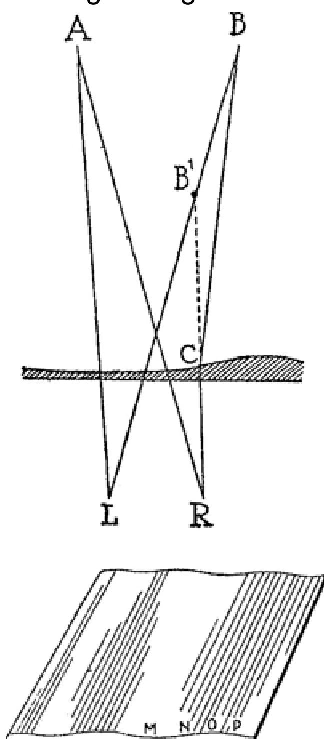



Fig. 98. Als men door een hobbelige ruit kijkt, lijkt de grond te golven.

van het punt B echter wordt de lichtstraal BR gebroken en volgt hij de weg BCR. Het gevolg is, dat de ogen gericht zijn alsof zij het punt B' bekeken, dat dichter bij ons ligt dan B. In een ander deel van de ruit wijken de stralen weer anders af, zodat het voorwerp verder van ons af schijnt te liggen. Zo begrijpt men, dat de zwakke hobbeligheid van het glas een sterke schijnbare golving van de voorwerpen buiten zal veroorzaken, al is natuurlijk de samenwerking der invloeden op rechter en linker oog soms vrij ingewikkeld.

Als het linkeroog bv. door een effen gedeelte van de ruit kijkt, het rechteroog door de hobbels, kan men gemakkelijk het ontstaan der stereoskopische werking in bijzonderheden nagaan. Sluit het linker oog en schommel met het hoofd een weinig heen en weer: waar de ruit een hol gedeelte (M) heeft (fig. 98), schommelen de bijzonderheden van de grond in dezelfde zin; waar de ruit bol is (O), tegengesteld (Waarom?). Open nu beide ogen: de gebieden M en O komen nu overeen met plaatsen van de grond die we op normale afstand zien; door N kijkend met het rechter oog zien we een berg en door P een dal. Overtuig u van dit alles door de waarneming en geef u rekenschap van de opgemerkte bijzonderheden!

Een verschijnsel dat hier nauw mee verwant is neemt men waar als men vlak bij een wateroppervlak staat met zeer zwakke golfjes. De ogen trachten zich te richten naar het spiegelbeeld

van een boomtak bijvoorbeeld; maar doordat elk oog op een verschillend golfoppervlak kijkt, worden de twee beelden onophoudelijk op andere hoekafstanden van elkaar gebracht, en is het onmogelijk er de oogassen rustig op in te stellen. Dit geeft een zeer bijzonder en moeilijk te beschrijven gevoel. Zodra we één oog sluiten zien we het wateroppervlak zelf nauwelijks meer; we kunnen ons voorstellen dat we niet een spiegelbeeld zien, maar de boom zelf, door de wind bewogen. Kijken we met twee ogen, dan krijgen we ineens het bewustzijn van het gerimpeld wateroppervlak zelf, maar dit oppervlak *glanst*: dit is het typisch verschijnsel dat ontstaat, als de twee ogen zeer verschillende beelden geven, het ene licht en het andere donker.

## 106. Het mannetje in de maan.[1)]

'Het mannetje in de maan' is een uitstekend voorbeeld om ons te leren voorzichtig zijn bij het waarnemen. De donkere en lichte vlekken op de maan zijn eigenlijk de vlakten en de bergen, en het is duidelijk dat hun verdeling een zeer grillige is. Onbewust nu zoeken we in die grillige lichtverdeling naar bekende vormen: we vestigen *de aandacht* op bepaalde bijzonderheden, en daardoor schijnen die duidelijker en opvallender te worden; terwijl de vormen waar we niet op letten minder duidelijk worden.

Zo kan men in de volle maan tenminste drie vormen van menselijk gelaat zien: van opzij, drie kwart, en van voren. Men kan er een vrouwefiguur in zien, een oud vrouwtje met een takkebos, een haas, een kreeft, enz.

Dergelijke begoochelingen hebben aan de beste waarnemers parten gespeeld, onder andere in het beroemde geval van de 'kanalen' op Mars. Bij menige fantastische beschrijving van een luchtspiegeling of fata morgana is het goed hieraan te denken.

## 107. Het draaiende landschap en de meelopende maan.

Let op twee bomen of twee huizen die ongelijk ver van ons verwijderd zijn: zodra wij bewegen, zien we *hoe het verste van de twee met ons meegaat, en het dichtstbij gelegen achterblijft*. Het

1) Harley, Moon-lore (London 1885). - Titchener, Experimental Psychology.

is een eenvoudig verschijnsel van *verschilzicht* (= 'parallax'), een verschijnsel van meetkundige aard, zonder bijzondere natuurkundige achtergrond.

*Het landschap in de omlijsting van de raampjes*
*Snelt met een wilde vaart, en hele vlakten*
*Met plassen, velden, bomen, en wat hemel,*
*Zij storten zich in 't wentlen van de draaikolk* ...

*P. Verlaine, La bonne Chanson.*

Een van de eerste dingen die mij als kind troffen als ik in de trein zat, is de merkwaardige draaiende beweging die het landschap schijnt uit te voeren. Stel ik kijk aan de rechterzijde van de trein: dan zie ik al de dichtbijgelegen dingen naar rechts wegvluchten, terwijl de ver afgelegen partijen met mij mee naar links bewegen. Het is alsof het gehele landschap draait om een denkbeeldig punt: het punt waar ik toevallig de blik op richt. Of ik in de verte tuur of meer dichtbij, altijd lijkt mij het punt dat ik bekijk op zijn plaats te blijven, terwijl de verdere punten meelopen, de dichterbij gelegen punten achterblijven. Neem de proef! Het is duidelijk dat deze gezichtsindrukken volgen uit het verschilzicht; het nieuwe wat erbij komt, is dat we alles betrekken op het punt waarheen onze blik gericht is, en dit in rust zien: dit is een psychologische eigenaardigheid van onze gezichtswaarnemingen. Als we 's avonds wandelen, fietsen, sporen, zien we de maan aan de verre gezichteinder getrouw 'met ons meegaan'. Ook de zon, ook de sterren - maar daar letten we niet zo op. Dit bewijst dat we onze aandacht vestigen op het landschap, en dus bepaalde partijen daarvan in rust zien; de verder gelegen hemellichamen schijnen dan door verschilzicht mee te bewegen.

## 108. Het zoeklichtverschijnsel.[1] De wolkenbanden.

Een zoeklicht werpt horizontaal een slanke, ijle lichtbundel over het nachtelijke heidelandschap. Ik weet dat de bundel zuiver rechtlijnig loopt; maar ik *kan* mij niet onttrekken aan de begoocheling dat hij gebogen is, in het midden het hoogst, aan beide kanten naderend tot de grond. Alleen door een stokje vóór mijn oog te houden overtuig ik er mij van dat de bundel werkelijk over zijn gehele lengte recht is.

Wat is de oorsprong van die begoocheling? Ik ben geneigd,

1) Bernstein, Zs. f. Psych. **34**, 132.

de baan als een boog te zien, omdat ik haar aan de ene zijde naar links zie dalen, aan de andere zijde naar rechts. Alsof een simpele horizontale, rechtlijnige telegraafdraad niet net hetzelfde vertoonde! Bij de lichtbundels in de avond heb ik echter geen aanknopingspunten om de afstanden te schatten met behulp van het geheel der omringende voorwerpen, en weet ik a priori niets over de vorm van de bundel.

Een dergelijk verschijnsel zien we 's avonds, aan een rij hoog opgehangen straatlantarens, vooral wanneer er geen evenwijdig lopende huizenrijen zijn, of indien bomen die aan 't gezicht onttrekken. Men ziet dan de rij der lichten *gekromd*, juist zoals een zoeklichtenbundel.[1)]

Onmiddellijk hieraan verwant is de waarneming, dat de verbindingslijn der horens van de Maan, tussen eerste kwartier en volle Maan bijvoorbeeld, volstrekt niet loodrecht schijnt op de richting Zon-Maan; klaarblijkelijk denken we ons deze richting als een gekromde lijn.

De wolkenrijen die schijnen uit te stralen van een punt van de gezichteinder, en zich aan de andere zijde van het uitspansel weer verenigen, zijn in werkelijkheid volgens evenwijdige rechte lijnen gerangschikt. Zie ook § 191.

Het is bijzonder indrukwekkend om zich 's nachts dichtbij een sterke vuurtoren te bevinden. De grote bundels zwaaien over het landschap, convergeren aan de andere zijde naar het tegenpunt en wentelen daar omheen.

## 109. De schijnbare afplatting van het hemelgewelf.[2)]

Wanneer we buiten in het vrije veld staan, en naar de hemel kijken, hebben we in 't algemeen niet de indruk van een grenzeloze ruimte boven ons; ook niet de indruk van een halve bol die over ons en de aarde gestulpt is. Veeleer lijkt het een gewelf, waarvan de hoogte boven ons hoofd veel geringer is dan de afstand van ons tot aan de gezichteinder (fig. 99). Het is een *indruk*, meer niet, maar voor de meeste mensen een zeer overtuigende, de verklaring zal dus een psychologische moeten zijn, niet een natuurkundige.

1) G. Ten Doesschate, Nederl. Tijdschr. voor Geneesk. **74**, 748, 1930.
2) Voor de zeer rijke litteratuur over dit onderwerp en de volgende nummers zie men: A. Müller, die Referenzflächen der Sonne und der Gestirne.
E. Reimann, Zs. f. Psych. und Physiol. der Sinnesorgane, 1920.
R. von Sterneck, Der Sehraum auf Grund der Erfahrung (Leipzig, 1907).

Iets van die schijnbare afplatting te *meten* is natuurlijk onmogelijk, maar we kunnen schattingen maken.

*a*. We vragen ons af hoe groot de verhouding

$$\frac{\text{oog—horizon}}{\text{oog—zenith}}$$

wel schijnt; volgens de waarnemers en de omstandigheden krijgt men antwoorden die meestal tussen 2 en 4 liggen.

*b*. We schatten zo goed mogelijk de richting waarin zich het midden *van de boog* zenith-gezichteinder schijnt te bevinden. Bij nameting (§ 235) blijkt dit midden niet op $45^{o}$ hoogte te liggen, maar veel lager, meestal op $20^{o}$-$30^{o}$; veel zeldzamer vindt men waarden zo laag als $12^{o}$ of zo hoog als $45^{o}$. Het komt

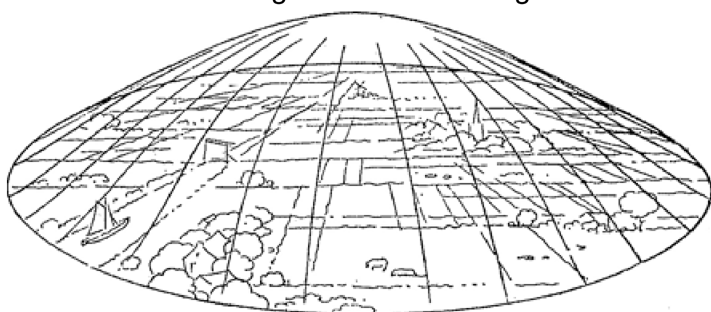


Fig. 99. Over het landschap schijnt zich de hemel als een soort kap te welven.

er op aan, onbevooroordeelde waarnemers te vinden, en hun duidelijk te maken *dat ze niet de hoek, maar de boog in twee moeten delen*. Ook is het zeer belangrijk, de plaats van het zenith goed te schatten: liefst door zich eerst naar de éne, dan naar de tegenovergestelde windstreek te keren, en te kijken of de twee aldus gemaakte schattingen overeenstemmen.

Voor elk der kenmerkende getallen *a* en *b* neme men het gemiddelde van een 10-tal schattingen.

De schijnbare afplatting van het hemelgewelf hangt van allerlei omstandigheden af. Ze neemt sterk toe als de hemel bewolkt is en bij schemering, ze neemt af bij donkere sterrelucht. Gemiddeld is de 'halveringshoek' $22^{o}$ bij dag, $30^{o}$ bij nacht. Merk op dat waarnemingen op zee hieromtrent van grote waarde zijn, aangezien daarbij het uitzicht geheel vrij is en geen nevenomstandigheden de schatting storen.

Door een stuk rood glas gezien - zó groot dat men niet afge-

leid wordt door de begrenzingen ervan - lijkt de hemel vlakker; door een stuk blauw glas hoger en dichter bij de halve bolvorm.[1)]

Uitvoeriger schattingen kunnen ons nog nauwkeuriger inlichten over de welving die we onbewust aan de hemelkap toeschrijven. Het blijkt dat veel waarnemers er een soort *helmvorm* in zien.

## 110. Overschatting van de hoogte. (fig. 100)

Met de afplatting van het schijnbare hemelgewelf schijnt samen te hangen, dat wij de hoogten boven de gezichteinder meestal te groot schatten. Blijkbaar verwarren wij onbewust steeds de meting van de *boog* met de meting van de *hoek*; het punt M, zo gekozen dat HM = MZ,

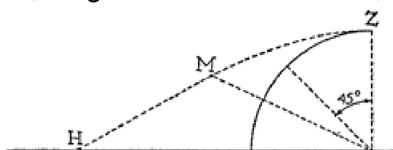



Fig. 100. De schijnbare boog van zenith tot horizon in twee verdelen.

ligt veel lager dan 45° boven de horizon, en lijkt ons toch halfweg.

De zon in de winter, op middagtijd, schijnt vrij hoog te staan, en is in onze gewesten toch slechts 15° boven de kim. 's Zomers lijkt ze ‘bijna in het zenith’, terwijl ze feitelijk nooit hoger komt dan 61°.

Evenzo overschatten we de hoogte van heuvels en de steilheid van een voor ons opstijgende helling. Zelfs komt het voor, dat waarnemers de kleine kring om de zon of de maan (§ 134) als hoger dan breed beschrijven.

Men vermijdt deze gezichtsbegoochelingen grotendeels, als men het landschap met half dichte ogen bekijkt: dan werken alleen licht- en schaduwpartijen als grote massa's.

## 111. De schijnbare vergroting van zon en maan aan de gezichteinder.

Dit is een van de sterkste en meest algemeen bekende gezichtsbegoochelingen. Schrikwekkend groot kan de maan koperkleurig oprijzen, maar nietig klein is ze als ze hoog in de lucht zit! En de zon:

> *'t wordt watergroene, omhooge*;
> *omleege, brandt en broeit*
> *de groote zonne nog*,
> *die zinkt en grooter groeit*.
>
> *G. Gezelle, Rijmsnoer, X* (*Avondrood*).

1) Dember en Uibe, Ann. Phys. **61**, 313, 1920.

*De groote, tomaatroode zon ....*
*De zon wierd grooter en grooter, en rood.*

*Timmermans, Pallieter, blz.* 3 *en blz.* 30.

Is het wel een begoocheling? - We gaan een beeld van de zon ontwerpen en dit meten. Neem een brilleglas van 2 m brandpuntsafstand[1)]; stel het op in een kurk waarin u een snede gemaakt heeft, en laat er het licht der ondergaande zon op vallen (fig. 101*a*). De proef gebeurt vóór het open raam of buiten, want de vensterruit zou de scherpe beeldvorming bederven. Op ongeveer 2 meter achter het brilleglas vangen we de lichtbundel op een

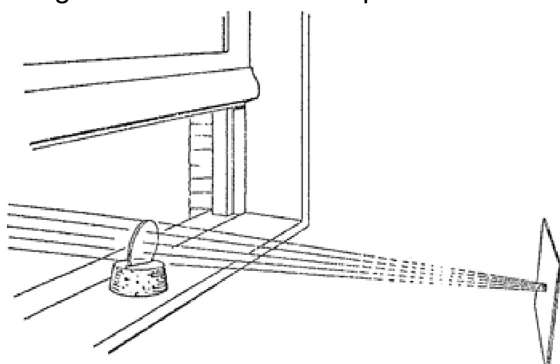


Fig. 101*a*. Het ontwerpen van een zonnebeeldje met een brilleglas van lange brandpuntsafstand.

stuk papier op, en zie, daar tekent zich een keurig scherp beeldje van de zon af! Is het niet helemaal rond, dan ligt dit daaraan, dat het brilleglas niet goed loodrecht op de invallende zonnestralen stond: draai het een weinig heen en weer, laat het iets meer of iets minder hellen. Zoek de plaats waar u het papier moet houden om het zonnebeeldje zo scherp mogelijk te krijgen, teken met twee potloodstreepjes de grootte van de middellijn aan, en meet die met een meetlatje, op 0,5 mm nauwkeurig. Neem liefst de *horizontale* diameter, omdat de vertikale door de aardse straalbreking iets verkleind wordt. Herhaal deze meting een paar maal en neem het gemiddelde.

Nu dezelfde proef bij hoge zon! De opstelling is iets moeilijker;

1) De opticien noemt het '+ 0,50'; vraag een rond, onafgeslepen glas, met ruwe randen. Prijs ongeveer 0,50 Gld.

bevestig de kurk met een spijker hoog tegen een paal: door de juiste zijde van de paal te kiezen, en de kurk om de spijker te laten draaien, kan men het brilleglas goed loodrecht op de lichtstralen instellen (fig. 101*b*). Meet het zonnebeeldje: het is (binnen de waarnemingsfouten) *bij hoge zon precies even groot als bij lage zon*! Zelfs de nauwkeurigste metingen met de



Fig. 101*b*.

sterkste kijkers vertonen niet het minste verschil.

De vergroting van zon en maan nabij de gezichteinder is dus een psychologisch verschijnsel. Maar ook dat gehoorzaamt aan vaste wetten, ook dat kan in getalmaat geschat worden. Verschaf u een witkartonnen schijf van 30 cm middellijn, en verwijder er u zover van, dat de schijf even groot lijkt als de maan. Natuurlijk is een werkelijke *vergelijking* niet toegelaten, anders vindt u evenals bij een ware meting dat de grootte altijd dezelfde is. Keer u dus eerst naar het hemellichaam, prent u goed in hoe groot het lijkt, draai u om en vergelijk het herinneringsbeeld met de schijnbare grootte van de schijf. 't Gaat nog mooier als u een reeks witte schijven van toenemende grootte op een zwarte achtergrond plakt, en u altijd op dezelfde afstand er vandaan plaatst. Voer dergelijke schattingen zowel bij hoogstaande als bij laagstaande maan uit. - Ook met de zon zijn zulke schattingen mogelijk; vermijd verblinding door gebruik van een donker glaasje, bv. een sterk gesluierde fotografische plaat, en kijk daarna met onbeschermd oog naar de witte schijven. De waarnemingen zijn moeilijk, omdat het psychologische verschijnsel de invloed ondergaat van allerlei subtiele faktoren, schommelingen van de aandacht, enz. Merk op hoeveel beter het na enige oefening gaat!

De aldus verkregen getallen leren ons, dat de zon of de maan nabij de gezichteinder wel 2,5 tot 3,5 maal zo groot lijken als hoog aan de hemel! Het verschil tussen het natuurkundig en het psychologisch verschijnsel is dus wel zeer opvallend. Het effekt neemt nog toe bij bewolkte lucht en in de schemering.

De schijnbare vergroting der ondergaande zon is veel opvallender in de vlakte dan wanneer ze achter hoge bergen ondergaat; op zee nochtans is de vergroting gering.[1)]

1) Vaughan Cornish, Scenery and the Sense of Sight (Cambridge 1935), hoofdstuk II; met een belangwekkende theorie voor het verschijnsel.

## 112. Het verband tussen de schijnbare vergroting der hemellichamen nabij de gezichteinder en de vorm van het hemelgewelf. (fig. 102)

Men heeft getracht, dit verschijnsel te herleiden tot dat van de schijnbare afplatting van het hemelgewelf. De opvatting is, dat wij ons de zon en de maan even ver denken als dit hemelgewelf, de lage zon dus verscheiden malen verder verwijderd dan de hoge zon; dat wij ze toch onder dezelfde gezichtshoek waarnemen, schrijven wij (onbewust) daaraan toe, dat ze verscheiden malen groter is:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

.

Om de juistheid van deze samenhang te toetsen, heeft men de schijnbare grootte van zon en maan op verschillende hoogten

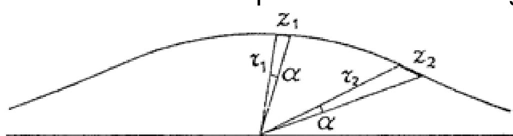



Fig. 102. Waar het hemelgewelf ver verwijderd lijkt, schijnt de zonneschijf groter.

boven de kim geschat (vgl. § 111). Deze proeven zijn moeilijk. Zowel bij dag en blauwe lucht als 's nachts bij onbewolkte sterrenhemel bewijzen de uitkomsten, dat de grootte van zon of maan inderdaad ongeveer evenredig met de afstand van het hemelgewelf schijnt te veranderen. - De laagstaande zon lijkt door de nabijheid van wolken vergroot (*niet* door voorwerpen op aarde die zich tegen de kim aftekenen); dit komt, omdat het bewolkte hemelgewelf zoveel afgeplatter is dan het onbewolkte, dus zoveel verder van ons verwijderd aan de kim, en wij de zon even ver terugschuiven, om haar althans niet vóór de wolken te denken. - Evenzo wordt de laagstaande maan, bij dag, door de nabijheid van wolkenmassa's groter geschat. Bij heldere lucht is bijzonder opmerkelijk, dat zij in de schemering veel groter lijkt dan bij dag of bij nacht: dat komt overeen met de grotere afplatting van het hemelgewelf bij de schemering. Als het 's nachts nevelig is, zodat de maan de naburige hemel sterk verlicht, wordt voor ons gevoel de weinig afgeplatte hemelvorm van de nacht weer vervangen door de platte schemeringsvorm, en de maan lijkt weer groter. Aan wie zou denken dat de schijnbaar grotere afmetingen van de maan nabij de kim of bij nevel samenhangen met de lichtverzwakking welke zij dan ondergaat, kan door twee waarnemingen geantwoord worden: *a*. de maan*sikkel* lijkt *niet* groter bij nevel;

voor ons is dit begrijpelijk, omdat de sikkel de omgevende lucht slechts weinig verlicht; *b*. bij maansverduisteringen lijkt de hoogstaande maan niet vergroot. Uit al het vorige blijkt wel, dat het aankomt op de hemelachtergrond, en dat die bepaalt hoe groot we zon en maan schatten. - Toch moeten wij toegeven, dat er ook bezwaren zijn tegen het leggen van een zo nauw verband tussen beide verschijnselen: vele mensen zien de zon of de maan aan de horizon juist 'dichterbij', of zijn helemaal niet in staat iets over de schijnbare afstand te zeggen, terwijl ze toch sterk de indruk van de vergfoting hebben. Beslissend behoeft zulk een tegenwerping mijns inziens niet te zijn; want het is mogelijk dat we, bij het rechtstreeks stellen van de vraag omtrent de afstand, andere psychologische motieven in werking brengen dan die welke bij de onbewuste beoordeling de doorslag geven.

## 113. De holle aarde.[1)]

Dit is een mooie tegenhanger van de gezichtsindruk die het hemelgewelf op ons maakt: van uit een luchtballon ziet men bij heldere lucht hoe de aarde zich in de verte opwaarts schijnt te welven, zodat ze een holle schaal lijkt boven dewelke wij zweven. Het horizontale vlak door ons oog schijnt ons altijd vlak te blijven; andere horizontale vlakken daarboven of daaronder schijnen zich in de verte altijd naar dit vaste horizontale vlak toe te buigen.

Als de ballon zich op een paar kilometer boven wolkenbanden bevindt, zien wij die gekromd, met de bolle zijde naar beneden en de holle zijde naar ons toe. Is er een wolkenlaag beneden en een andere boven ons, dan schijnen wij te zweven tussen twee reusachtige horlogeglazen.

Dezelfde begoochelingen zullen allicht ook in een vliegtuig waar te nemen zijn.

## 114. De onderschattingstheorie.

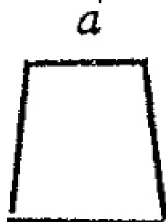
Op geniale wijze is von Sterneck er in geslaagd, een wiskundige formulering te geven van het schijnbaar zo onbepaalde psychologische verschijnsel van 'het hemelgewelf'. Het moge waar zijn dat hij het niet afdoende *verklaart*, hij brengt het in elk geval terug tot een grote groep waarnemingen, waar we door dagelijkse ervaring vertrouwd mee zijn.

1) C. Flammarion, l'Atmosphère (1888), blz. 169.

Hoe verder de voorwerpen, hoe moeilijker het is om hun afstanden te onderscheiden. Straatlantarens verder dan 150 m lijken 's nachts alle even ver. - De bergen aan de gezichteinder, de hemellichamen lijken de een niet verder verwijderd dan de andere.

De normale, 'naieve' waarnemer onderschat al de verre afstanden: een brand bij nacht; inslaande bliksem; de lichten van een haven, gezien van uit de volle zee.

Die onderschatting van de afstanden is gering voor de nabije voorwerpen, en wordt sterker naarmate zij verder verwijderd zijn; tenslotte nadert de schijnbare afstand tot een grens. Rechthoekige velden, gezien van uit de trein, maken de indruk van trapezia:




want de hoek waaronder ik de zijde *a* zie past bij haar ware afstand, maar is te klein voor haar (geringere) schijnbare afstand. - Als de trein een tunnel nadert, en u kijkt uit het raampje naar de gemetselde muur van de tunnelingang, ziet u de stenen zienderogen zwellen en groter worden[1)]; verklaring: als de ware afstand tweemaal kleiner wordt, zien we de stenen onder een tweemaal grotere hoek, maar de schijnbare afstand lijkt ons slechts anderhalf maal kleiner (bijvoorbeeld) en dus is het alsof de stenen zelf waren gegroeid.

Von Sterneck beproefde het volgende eenvoudig verband te leggen tussen de schijnbare afstand *d'* en de ware afstand *d*:

$$d' = \frac{cd}{c+d}$$

. Hierin is *c* een constante voor elk bijzonder geval: de grootste afstand die we onder de gegeven omstandigheden van belichting enz. nog kunnen schatten; *c* variëert van 200 meter tot 20 km. Wij zien hoe met deze formule *d'* praktisch gelijk is aan *d*, zolang *d* klein is ten opzichte van *c*; wordt *d* vergelijkbaar met *c*, dan treedt toenemende onderschatting op; voor grote *d* nadert de schijnbare afstand tot een grens. De formule beschrijft dus de ervaring qualitatief goed, en uitvoeriger waarnemingen gaven ook verrassend goede quantitatieve overeenstemming.

De onderschattingstheorie verklaart de overschatting der berghellingen door den waarnemer W die beneden staat, en die de afstand WB schat alsof het WB' was, dus AB als AB' ziet. En zij eist als logisch gevolg een onderschatting der hellingen door den waarnemer die zich op de hoogte bevindt (fig. 103). We zullen thans zien hoe zij ook de schijnbare vorm van het

1) E. Mach, Erkenntnis und Irrtum (Leipzig 1905), blz. 331.

hemelgewelf tracht te verklaren, en daardoor dus ook de schijnbare vergroting der hemellichamen bij de kim.

Stellen wij ons bijvoorbeeld een wolkenlaag voor, op een hoogte van 2,5 km boven ons hoofd. We zouden die moeten zien als een uiterst vlakke schaal, want door de kromming der aarde is ons oog 178 km van het wolkendek bij de gezichteinder verwijderd, 2,5 km van het wolkendek in 't zenith. Zo zien we echter stellig de bewolkte hemel niet! De korte afstand wordt een weinig, de lange wordt zeer onderschat. Stel dat we de verhouding

$$\frac{\text{oog—gezichteinder}}{\text{oog—zenith}}$$

als ongeveer 5 schatten; dan betekent dit, dat in deze omstandigheden *c* = 10,6 km bedraagt: de onderschattingsformule

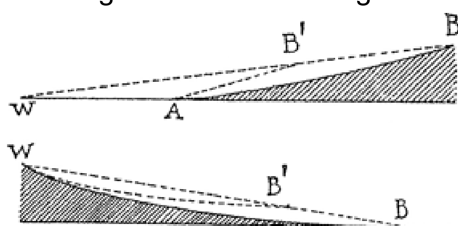



Fig. 103. De waarnemer W overschat de stijging en onderschat de daling.

levert dan de goede waarden (beproef dit!). Hieruit volgt, dat we de bewolkte lucht als een soort gewelf, een ‘omwentelingshyperboloïde’ moeten zien, wat inderdaad met de algemene indruk overeenkomt die wij ervan krijgen. - Merk op, dat we dus eigenlijk het hemelgewelf niet afgeplat zien, maar juist relatief *hoger* dan het is!

Hoe wordt het nu echter voor de blauwe lucht, voor de sterrenhemel? Von Sterneck neemt telkens maar een andere waarde van *c*, en het blijkt dat zijn formule dan in elk bepaald geval de waarnemingen verrassend goed beschrijft. Het wordt echter wel moeilijk te begrijpen hoe wij in deze gevallen kunnen spreken van een bepaalde ‘afstand’, die onderschat wordt. - En zo komen wij tot de algemener vragen: hoe krijgen wij enige indruk van afstand bij zulke onbepaalde voorwerpen als wolken? En bij de blauwe lucht? Bij de onbewolkte nachthemel? De onderschattingstheorie moge waar zijn voor aardse voorwerpen, over wier afmetingen en afstanden we door allerlei ervaringen ingelicht zijn, - het lijkt zeer twijfelachtig of zij op het uitspansel toegepast mag worden. Daarenboven is de oorsprong der onderschatting nog onopgehelderd.

## 115. De blikrichtingstheorie van Gauss.

Er zijn nu een reeks waarnemingen, die aantonen dat de vorm van het hemelgewelf en de schijnbare vergroting der hemellichamen nabij de kim in hoofdzaak samenhangen met de blikrichting ten opzichte van ons lichaam. Door de ervaring van vele geslachten zijn we beter ingesteld op het waarnemen vóór ons uit dan in de hoogte, en dit heeft blijkbaar invloed op de schatting van afstanden en afmetingen.

Als de volle maan hoog aan de hemel staat, zetten wij ons in een schommelstoel; of op de grond, met de rug tegen een hellend voorwerp. Terwijl we aldus in sterk achteruit hellende houding waarnemen, maar het hoofd in zijn gewone stand ten opzichte van het overige van

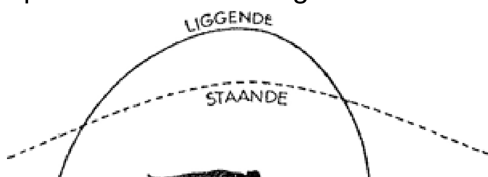


Fig. 104. De vorm van het hemelgewelf van een staande en voor een liggende waarnemer.

het lichaam houden, schijnt de maan ons merkbaar groter. Komen we gauw overeind, zodat onze blik nu naar boven gericht moet worden, dan lijkt ze weer kleiner. Omgekeerd lijkt de volle maan nabij de gezichteinder veel kleiner als we ons naar voren buigen.

Beide verschijnselen kan men afwisselend zien als de zon 30° tot 40° hoog zit, en haar licht door mist getemperd is. Buig u achteruit en vooruit: de schijf lijkt afwisselend groter en kleiner. Leg u met de rug plat op de grond: het hemelgewelf lijkt samengedrukt aan de zijde naar dewelke *nu* onze schedel gekeerd is; terwijl het aan de tegenovergestelde zijde zuiver bolvormig lijkt (fig. 104). Wij zien hier duidelijk, dat de (t.o.v. ons lichaam) naar beneden gerichte en de vooruit gerichte blik ongeveer gelijkwaardig zijn, terwijl de naar boven gerichte blik de voorwerpen samengedrukt doet lijken.

Hang u met de knieën aan een rekstok en kijk met het hoofd naar beneden rond: u ziet het hemelgewelf als een halve bol.[1)]

Al deze waarnemingen bevestigen elkaar. Hier komt nog bij, dat sterrebeelden, gezien door een kijker, dus onttrokken aan de invloed van het landschap, insgelijks groter schijnen wanneer

1) Vgl. ook O. Baschin, Naturwiss. **7**, 510, 1919; **13**, 346, 1925.

ze zich laag boven de kim bevinden; het enige dat hier invloed kan hebben is de blikrichting.[1)]

Beproef nu niet, een verdere controle te verkrijgen door de schijnbare grootte van zon of maan in een spiegel te beoordelen, en aldus bv. de hoogstaande maan met horizontale blikrichting te bekijken. Zodra de waarnemer iets merkt van de aanwezigheid van een spiegel, is de begoocheling al ten dele verdwenen. Deze soort proef is daarom zeer moeilijk goed uit te voeren.

Verschillende andere theorieën omtrent de hier besproken gezichtsindrukken zijn gemakkelijk te weerleggen. Zo heeft men wel beweerd, een ‘physische theorie’ van de vorm van het hemelgewelf te kunnen geven, welke theorie dan blijkt neer te komen op het zeer onbegrijpelijke beginsel, dat we de hemel des te verder verwijderd zien naarmate zijn helderheid groter is, en wel evenredig met de wortel uit de helderheid.[2)] De blauwe hemel is donkerder in 't zenith dan aan de horizon, en zou daardoor gedrukt schijnen. Deze theorie wordt echter afdoende weerlegd, door dat de gelijkmatig bewolkte hemel gebleken is *helderder* te zijn in het zenith dan aan de kim[3)], terwijl we hem toch ook gedrukt zien. Bij bewolkte lucht schijnt trouwens de plaats waar de zon zit, en die helderder lijkt, altijd dichter bij ons dan de omringende delen van het uitspansel.

## 116. Invloed van de aardse voorwerpen op de schatting van de afstand tot het hemelgewelf.[4)]

Plaats u voor een lange rij huizen en kijk naar de middenste daarvan: de hemel daarboven is *veel* dichter bij u, boven de uiteinden van de rij is hij veel verder verwijderd. - Evenzo lijkt de hemel boven het bos veel dichter bij ons, over 't vrije veld veel verder weg.

Blijkbaar schatten we dus de afstand van het hemelgewelf op 50 of 60 meter bv.! Maar het is voldoende dat we voorwerpen zien waarvan we de verre afstand *kennen*, opdat hun hemelachter-

1) J. van der Bilt, Hemel en Dampkring **7**, 56, 1909.
2) Dember en Uibe, Ann. Phys. **61**, 313, 1920.
3) H. Stücklen, t.a.p.
4) G. Ten Doesschate, Nederl. Tijdschr. voor Geneeskunde, **74**, 748, 1930. Pohl, Naturwiss. **7**, 415, 1919.
H. Stücklen, Zur Frage nach der scheinbaren Gestalt des Himmelsgewölbes. Diss. Göttingen, 1919.

grond ons onmiddellijk veel verder verwijderd zou schijnen. *De aardse voorwerpen nemen in zekere mate elk hun hemelachtergrond met zich mee*. - Men ziet hoe zuiver psychologisch al deze verschijnselen bepaald zijn, en hoe onmogelijk het is, te spreken van een ideaal 'referentie-oppervlak' dat voor ons *het* hemelgewelf zou zijn!

Kijk langs een lange spoorweglijn of een grote weg met bomen, die ons duidelijk de grote afstand tot bewustzijn brengen: de hemel lijkt in die

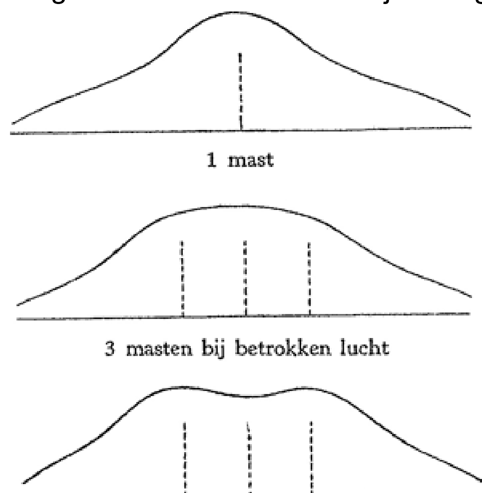



Fig. 105. De schijnbare vorm van het hemelgewelf boven radiomasten.

richting veel verder verwijderd dan in andere windstreken. Bedek echter het landschap tot aan de gezichteinder metbehulp van een stuk papier: de gezichteinder komt ineens dichterbij.

Bij wijze van tegenproef kunnen we op een dergelijke wijze aan de blik een geleiding geven in *vertikale* richting: de hemel lijkt daar dan hoger geworden. Buitengewoon treffend is dit verschijnsel aan de voet van een hoge toren, of nog beter bij de hoge ranke masten van een groot radiostation. Het hemelgewelf daarboven schijnt een soort koepelvormige opwelving te vertonen; tussen drie masten lijkt de gehele hemel opwaarts gedrukt. Verschillende waarnemers tekenen onafhankelijk van elkaar de schijnbare vorm op dezelfde wijze (fig. 105).

Kijkend naar zulk een mast vindt u een veel groter halveringshoek (§ 109) dan wanneer u op enige afstand een nieuwe bepaling doet met de rug naar de mast gekeerd. Bedek de horizon terwijl u naar de mast kijkt: er komen nu zelfs halveringshoeken van meer dan $45^{o}$, tot $56^{o}$ toe! Het hemelgewelf wordt dus nu hoger dan een halve bol gezien!

Hoe overtuigend deze waarnemingen ook zijn, - toch bedenke men dat zij, opzichzelf beschouwd, nooit de vorm van het hemelgewelf of de schijnbare vergroting aan de kim kunnen verklaren. Ook als men door een zeer donker glaasje waarneemt, ziet men nog altijd de hoge zon klein, de lage zon groot, terwijl er dan van het landschap niets meer te bemerken is.

## 117. De schijnbare grootte van zon en maan, gemeten in centimeters. De methode der nabeelden.[1)]

We weten dat de 'grootte' van zon en maan niet in lengtemaat door ons waargenomen kunnen worden; we kunnen alleen de *hoek* aangegeven waaronder wij ze zien. En toch is het merkwaardig, dat een groot aantal mensen volhouden dat ze die hemellichamen zien 'als een 'soepbord'; daarnaast is er een minderheid, die afmetingen opgeeft van de orde van een geldstuk. Wie daarover glimlacht, bedenke wel, dat ook een wetenschappelijk geschoold man het als een volstrekte onmogelijkheid *voelt*, de grootte der maan op te geven als 1 mm of als 10 meter; terwijl hij toch *weet*, dat 1 mm op 10 cm afstand, of 10 meter op 1 kilometer de maanschijf precies zouden bedekken. De psychologische faktoren die hier een rol spelen zijn nog zeer weinig bekend.

Iedereen weet, dat men nabeeldjes van de zon krijgt als men heel vluchtig in het felle hemellichaam kijkt en knipoogt (§ 88). Zulk een nabeeldje projekteert zich nu op elk voorwerp waar men naar tuurt; op een dichtbije muur maakt het de indruk van een erg klein, nietig ding; op verder verwijderde voorwerpen gezien, lijkt het groter. (Let wel: we schatten niet de gezichtshoek, maar de grootte van 'het ding zelf'). Dit effekt is volkomen begrijpelijk, want wil een voorwerp op afstand onder dezelfde hoek gezien worden als een voorwerp dichtbij ons, dan moet het in lengtemaat groter zijn. - Vrage: *wanneer lijkt het nabeeld even 'groot' als de zon zelf*? Verschillende waarnemers oordeelden, dat dit het geval was, wanneer de muur 50 tot 60 m verwijderd was, en wel geldt dit even goed bij dag als bij nacht: ziedaar dus de afstand waarop wij de maan en de zon van ons verwijderd voelen. Aangezien de gezichtshoek 1/108 is, zou dit overeenkomen met een middellijn van 45 tot 55 cm.

Op dezelfde wijze kon aangetoond worden, dat het nabeeld

1) Plateau, Bull. Acad. Belg. **49**, 316, 1880. - G. ten Doesschate, Ned. Tijdschr. voor Geneesk. **74**, 748, 1930.

op een muur die verder verwijderd is dan 60 m, nog altijd even groot lijkt als dat op de hemel vlak erboven (dus aan de kim). Terwijl het nabeeld, hoog in de lucht geprojecteerd, bepaald kleiner leek dan dat op een muur van 60 m afstand. Hier blijkt dus nog eens, dat wij inderdaad de afstand tot aan het hemelgewelf boven ons hoofd kleiner zien dan de afstand tot de kim, en dat 60 m al enigszins de grensafstand is van de onderschattingstheorie (vgl. § 114).

Door een nameting van zijn vroegere schetsen, heeft Vaughan Cornish getracht een belangwekkende grootheid te bepalen: de omvang (in hoekmaat) van het veld dat de mens als een eenheid ziet, *het tafereel*. De algemene indruk van een landschap hangt daar nauw mee samen.[1)]

1) Scenery and the Sense of Light (Cambridge, 1935).

# Regenbogen, kringen, kransen.

## *Regenbogen*.

De volgende eenvoudige waarneming is een detailstudie ter inleiding tot het begrijpen van de regenboog. Wat wij hier aan een enkele waterspatje zien gebeuren, zal zich straks in miljoenen regendruppels vertonen en de kleurenboog doen ontgloeien.

### 118. Interferentieverschijnselen aan regendruppels.[1)]

De velen onder ons die ook buitenshuis een bril dragen, klagen over de regendruppels die de beelden vervormen en bijna onherkenbaar maken. Misschien kan het hen troosten, als we de aandacht vestigen op de *prachtige* interferentieverschijnselen die 's avonds in diezelfde regendruppels waar te nemen zijn: het is voldoende, de blik te richten naar een verre lichtbron, een straatlantaren bijvoorbeeld. Een druppel die zich toevallig voor de pupil bevindt, verschijnt dan als vreemd gevormde lichtvlek, met zonderlinge uitsteeksels en inhammen, en is omzoomd door wondermooie buigingsstrepen, waarin ook kleuren zijn te onderscheiden (fig. 106a).

Een eerste merkwaardigheid is, dat de lichtvlek op haar plaats blijft, ook al verschuift men het lorgnet (een weinig) heen en weer. Een tweede, dat de algemene vorm en de uitbochtingen van de lichtvlek op het eerste gezicht geen verband schijnen te hebben met de vorm van de druppel. De verklaring is eenvoudig: vat het oog op als een kijkertje dat een beeld geeft van de verre lichtbron, de waterdruppel als een groep prisma'tjes die vóór het objectief worden gehouden. Dan is het duidelijk dat elk prisma'tje een groep stralen opzij werpt, onafhankelijk van de plaats van het objectief waar het zich bevindt (mits nog binnen de objectief-

1) A. Poppe, Pogg. Ann. **95**, 481, 1855. - Larmor, Proc. Cambr. Philos. Soc. 7, 131, 1891. - Bouasse, Diffraction, blz. 415 en vlg.

opening); de vorm van de lichtfiguur zal echter afhangen van de grootte van de brekende hoek en van de oriëntering van elk prisma'tje. Een vertikaal uitgerekte waterdruppel geeft inderdaad een horizontaal uitgerekte lichtvlek.

Maar nu de buigingsstrepen! Zij zouden er niet zijn, wanneer de waterdruppel toevallig de zuivere lensvorm had, en de lichtbron streng in een punt

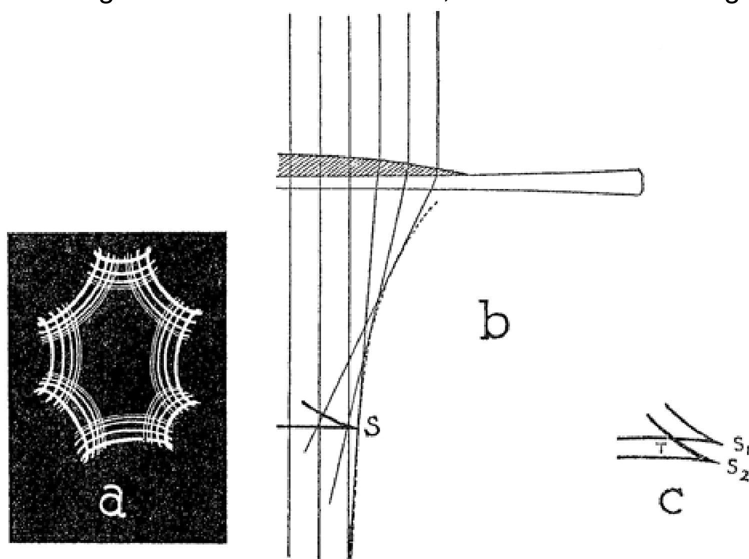



Fig. 106. Buiging der lichtstralen aan een regendruppel op een lorgnetglas. *a*. Interferentiefiguur. - *b*. De loop der lichtstralen; gestippeld: de omhullende brandlijn; met dikke lijn aangegeven; het golfoppervlak, dat bij S zijn omkeerpunt heeft. - *c*. Twee opeenvolgende golffronten, beide door T gaande.

afbeeldde; want dan kwamen alle delen van een golf, die tegelijk van de lichtbron vertrokken zijn, ook tegelijk in het beeldpunt aan. Maar het wateroppervlak is onregelmatig gekromd; de gebroken stralen ontmoeten elkaar niet in een brandpunt, maar worden omhuld door een *brandlijn* (fig. 106b). En in zulk een geval blijkt altijd, dat een punt in de nabijheid van de brandlijn door twee verschillende stralen getroffen wordt, die een verschillend lange lichtweg hebben afgelegd: er treedt dus interferentie op. Trekt men het golfoppervlak, dan blijkt dit een omkeerpunt te vertonen; op éénzelfde ogenblik gaan er door een punt T dus altijd twee golfoppervlakken, met een bepaald fazeverschil (fig. 106c).

De afstanden der donkere strepen, gemeten van een vast punt uit, zijn gegeven door de wet:

$\sqrt[3]{(2m+1)^2}$

, waarin *m* = 1, 3, 5, .... Zij verhouden zich dus zoals 2.1; 3.7; 5.0; 6.1; enz.

## 119. Het ontstaan van de regenboog.

*Mijn hart springt op als in de lucht*
*Een regenboog ik zie.*

*Wordsworth, The Rainbow.*

.... *De goudene Iris lacht!*
*En stil oversprei ik de vale vallei*
*Met een gloed van zonnig smaragd.*

*J. Perk, Iris.*

Zomermiddag. Drukkend warm. Donkere wolken aan de westelijke gezichteinder: een bui komt op! Snel verheft zich een zwarte wolkenboog, waarachter de lucht in de verte weer schijnt op te klaren; de voorste rand heeft een lichte zoom van cirri met fijne, dwarse streping. Hij overwelft de hele hemel, trekt geweldig over ons heen met een paar donderslagen. Ineens stroomt de regen neer; het is frisser geworden. Weer schittert de reeds lage zon. En in de bui die zich naar het Oosten verwijdert welft zich een rijkgekleurde, wijdgespannen regenboog.

Wanneer hij ook moge ontstaan, altijd vormt zich de regenboog door een lichtspeling in waterdruppels. Meestal zijn het regendruppels, soms de fijnere druppeltjes van een nevel. In de allerfijnste druppeltjes, die waaruit de wolken bestaan, is hij echter nooit te zien. Als dus iemand beweert dat hij een regenboog in een sneeuwbui heeft gezien[1)], of een ander maal bij geheel heldere lucht[2)], wees dan maar zeker dat de sneeuw half gesmolten was of dat er een van die fijne regentjes optrad die soms zonder bewolking kunnen ontstaan! Tracht ook zelf dergelijke belangwekkende waarnemingen te doen.

De druppels waarin de regenboog ontstaat, zijn meestal niet veel verder dan een of twee kilometer van ons verwijderd (plaat VIII*a*). In een bepaald geval zag ik de regenboog zich duidelijk aftekenen op de donkere achtergrond van een bos dat 20 m van mijn oog verwijderd was: de regenboog zelf vormde zich dus nog dichterbij. Er is een geval bekend waarin de regenboog zich vormde vóór een bos op 3 meter afstand[3)]!

Een Engels bijgeloof zegt, dat er een pot goud te vinden is

1) Das Wetter, **30**, 117, 1913.
2) Ibid. blz. 214.
3) Nat. **87**, 314, 1913.

bij de voet van de regenboog! Nog zijn er mensen die zich voorstellen dat die voet werkelijk bereikbaar is, dat je er naartoe kunt fietsen, dat daar een zeer bijzonder tintelend licht te zien is. Het moet duidelijk zijn dat de regenboog niet op een bepaald *punt is*, als een echt ding; hij is niets anders dan *licht dat van uit een bepaalde richting komt*.

Beproef de regenboog te fotograferen op ortho- of panchromatische film, met licht geelfilter; belichting 1/10 sec. met F/16.

## 120. Beschrijving van de regenboog.

> *De regenboog van Rubens is dofblauw*, **donkerder** *dan de lucht. Rubens verdient geen verwijt omdat hij geen optica kende, maar omdat hij nooit eens aandachtig naar een regenboog gekeken heeft.*
> *Ruskin, The Eagle's Nest*, **22**, 212.

De regenboog is een deel van een cirkel; het ligt voor de hand, schattenderwijze zijn ‘middenpunt’ te zoeken, dit wil zeggen: de *richting* waarin

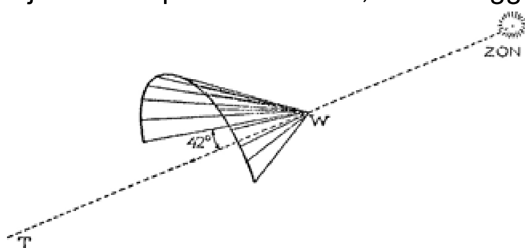



Fig. 107. De richting ten opzichte van de Zon, waarin wij de regenboog waarnemen.

we dat middenpunt zien. Het blijkt ons al dadelijk, dat een lijn die we naar dit middenpunt zouden trekken ergens onder de gezichteinder uitkomt, en wel *in het tegenpunt der Zon*. Denk u dus de verbindingslijn van de Zon naar het oog van den waarnemer, verlengd en in de Aarde dringend: dat is de as waarop als een wiel de regenboogkring zit (fig. 107). De stralen van de regenboog naar het oog vormen een kegelmantel, elk hunner vormt met de as een hoek van $42^o$ (= halve tophoek van de kegel).

Naarmate de Zon lager komt te staan, stijgt het tegenpunt, dus tevens ook de gehele regenboog, terwijl hij zich als een steeds toenemend gedeelte van de cirkelomtrek boven de gezichteinder verheft, en bij zonsondergang een halve cirkel is geworden. Anderzijds verdwijnt hij geheel onder de gezichteinder als de Zon hoger dan $42^o$ staat: dit is de reden waarom in onze gewesten

niemand ooit een regenboog in de zomer omstreeks middagtijd heeft gezien.

Meet zelf de halve tophoek, bijvoorbeeld door met een speld een briefkaart tegen een boom te bevestigen, en die zó te richten

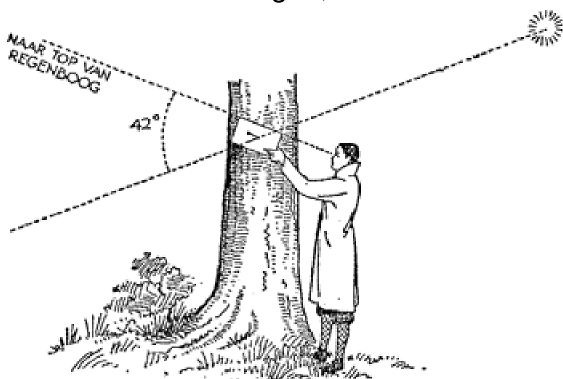



Fig. 108. We meten de hoekafstand van de regenboog tot het tegenpunt der Zon.

dat een harer kanten nauwkeurig naar de top van de regenboog wijst; de schaduw van de speld geeft de lijn Zon-waarnemer, en de hoekafstand van de regenboog tot het tegenpunt der Zon is rechtstreeks af te lezen (fig. 108).

Men kan ook met een der methodes van § 235 de tophoogte *h* bepalen en de hoek 2*a* tussen de

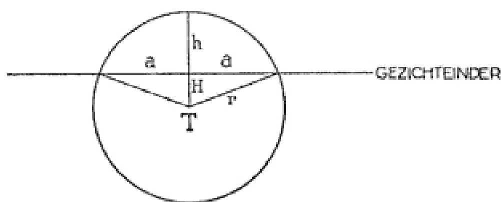



Fig. 109.

uiteinden van de boog, terwijl men ook de tijd van de waarneming optekent. Naderhand berekent men dan hoe hoog de Zon stond, hetgeen tevens de hoekafstand H geeft van het tegenpunt T onder de gezichteinder. Uit deze metingen vindt men drie verschillende waarden voor de gezochte straal *r*, waarvan men het gemiddelde kan nemen (zie fig. 109):

| | | |
|---|---|---|
| $r$ | = | $H + h$ |
| $\cos r$ | = | $\cos a \cdot \cos H$ |
| $\mathrm{tg}\, r$ | = | $\cot h \cdot \cot^2 M$, waarbij $\sin^2 M = \cos a \cos h$. |

Eigenlijk zou de regenboog niet als een boog, maar als een gesloten cirkel zichtbaar moeten zijn; dat we hem niet lager dan de gezichteinder kunnen volgen, is alleen daaraan toe te schrijven dat er in benedenwaartse richtingen geen zwevende regendruppels te zien zijn. In 'Physica'[1] werd opgemerkt, dat men van uit een vliegtuig de volledige regenboogkring moet kunnen zien, met de schaduw van het vliegtuig in 't centrum. Dit grootse schouwspel is inderdaad wel eens waargenomen.[2]

Een *nevenregenboog* om de hoofdregenboog wordt door veel mensen als iets uitzonderlijks beschouwd. Feitelijk echter is hij heel dikwijls, bijna altijd te zien, ofschoon natuurlijk veel zwakker dan de hoofdboog. Hij is er concentrisch mee, heeft dus ook het tegenpunt der Zon als middenpunt, maar zijn stralen vormen een hoek van 51$^{o}$ met de as Zon - oog.

De 'zeven kleuren van de regenboog' bestaan slechts in de verbeelding, het is een spreekwijze die een taai leven heeft, omdat we zo zelden de dingen zien zoals ze zijn! In werkelijkheid lopen de tinten geleidelijk in elkaar over, maar onwillekeurig sorteert het oog hen in enkele groepen. En nu is het opvallende, dat de verschillende regenbogen sterk onderling verschillen; ja, dat eenzelfde regenboog in de loop der waarneming veranderen kan. Vooreerst vindt men al grote verschillen, wanneer men eenvoudig de totale breedte van de kleurenband in hoekmaat meet (zie het aanhangsel, § 235). Verder is de volgorde wel altijd: rood - oranje - geel - groen - blauw - violet; maar in de verhouding der breedten van de onderscheidene kleuren en in hun helderheden zijn allerlei spelingen mogelijk. Het is mijn indruk dat verschillende waarnemers éénzelfde boog niet altijd gelijk beschrijven; om dus zeker te zijn van verschil tussen de regenbogen moet men òf de waarnemingen van één enkel persoon onderling vergelijken, òf vooruit nagegaan hebben dat twee waarnemers ongeveer overeenstemmen.

Bij dit 'eerlijk' beschrijven van de regenboogkleuren ontdekt men het merkwaardige feit, dat er dikwijls na het violet aan de binnenzijde van de boog nog verscheidene *overtallige bogen* komen; men ziet ze meestal het best waar de regenboog het helderst is, bijvoorbeeld nabij het hoogste punt. Hun kleuren zijn meestal afwisselend rose en groen. Eigenlijk is hun naam verkeerd gekozen, want ze behoren even goed bij de regenboog als de

1) Physica, **11**, 288, 1931.
2) Flammarion, l'Atmosphère, blz. 214 (1888).

'normale' kleuren, al zijn ze dan ook zwakker. Dikwijls veranderen deze overtallige bogen vrij snel in sterkte en uitgebreidheid, wat wijst op veranderingen in de grootte der druppels (§ 123).

In de nevenregenboog zijn de kleuren in omgekeerde volgorde van die van de hoofdregenboog gerangschikt: *de twee bogen keren het rood naar elkander toe*. Zeer zelden is de nevenregenboog zo helder, dat zijn overtallige bogen zichtbaar worden; ze volgen daar ook op het gewone violet, en komen dus aan de buitenkant van de nevenregenboog voor.[1)]

*Zoals zich over tere wolken welven*
*twee bogen, evenwijdig, evenkleurig*,
*de buitenste uit de binnenste geboren*, ....

*Dante, Paradiso, Cant. XII, v*. 10.

## 121. De regenboog vlak bij ons oog.

Het ontstaan van de regenboog in een zwerm waterdruppels wordt ons rechtstreeks zichtbaar gemaakt als we de Zon zien schijnen in het fijne waterstof dat om fonteinen en watervallen zweeft. Aan de kant van een stoomboot op zee, waar de boeggolf breekt en in schuim uiteenspat, ziet men soms regenbogen die heel lang met het schip meelopen, nu sterker, dan zwakker, volgens dat de wolk van druppeltjes dichter of ijler is; vooral wanneer het schip ongeveer in de richting naar de Zon toe stoomt, is er veel kans dat u in de juiste richting zult kunnen kijken.

Eenvoudige manieren om in de tuin een regenbui na te bootsen, waarin de Zon regenbogen zal toveren:

1. sproeien met een tuinslang;
2. het toestelletje van Tyndall[2)], waarbij een waterstraal onder druk tegen een rond metalen schijfje spuit, en zich in druppeltjes oplost;
3. de verstuiver van Antolik[3)] (fig. 110). Het is voldoende, krachtig met de mond bij *a* te blazen. De grootte der druppeltjes is te regelen door het buisje *bcd* een paar mm hoger of lager in te stellen t.o.v. de wijdere buis *ef*, hetgeen bereikt wordt door verschuiven van de doorboorde kurkschijf *g*; het komt ook aan op de grootte der uitlaatopening *u*. Men kan water bijvullen door de wijdere buis *a* zonder het toestelletje te moeten openen. Mijn ervaringen met dit toestelletje zijn voortreffelijk.

1) Waargenomen door Brewster in 1828.
2) Phil. Mag. **17**, 61, 1883.
3) Zs. phys. chem. Unterr. **4**, 275, 1891.

De verstuivers voor kamerplanten geven zó fijne druppeltjes, dat men daarin geen echte regenboog meer ziet, alleen een witte 'nevelboog' met blauwe en gele randen (vgl. § 128). Slechts hier en daar verschijnen toevallig

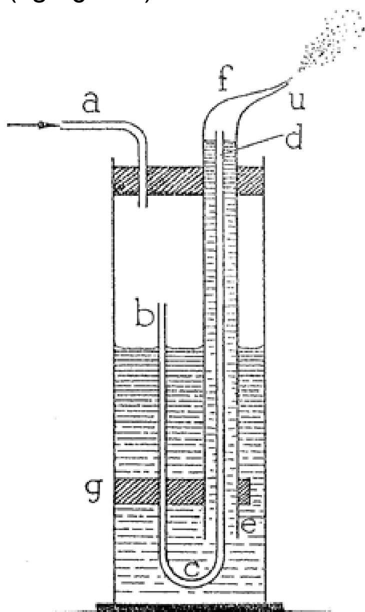
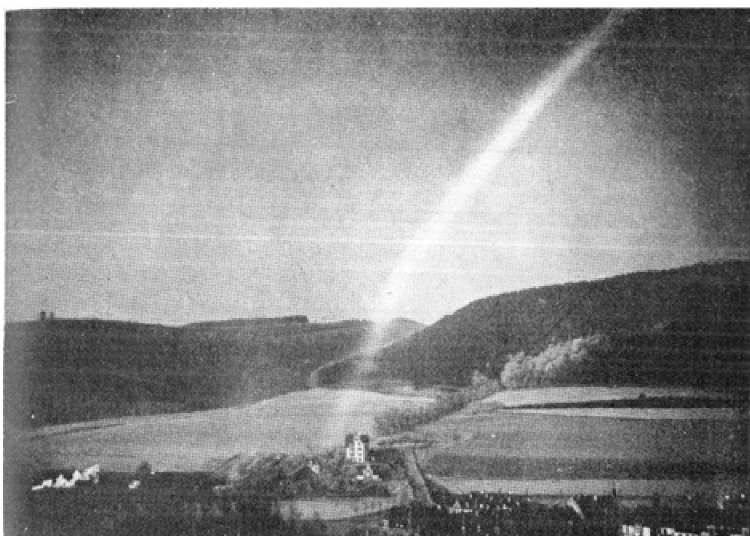


Fig. 110. Verstuiver voor het nabootsen van de regenboog.

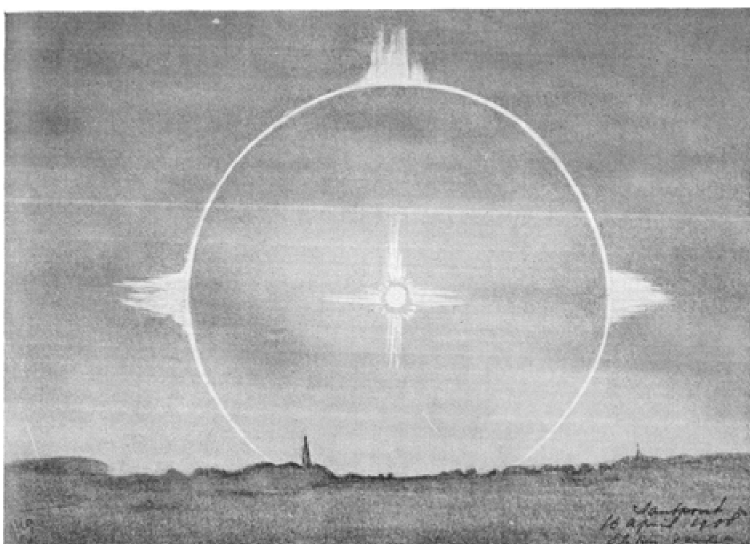
enkele zwermen grotere druppels en ziet men de gewone regenboog opflitsen.

Zoek de regenbogen altijd in een richting die 42° van het tegenpunt der Zon verwijderd is, en liefst tegen een donkere achtergrond!

Bij dergelijke proeven kan men verschillende aardige waarnemingen doen. Men ziet deze regenbogen dikwijls als een geheel gesloten cirkel, omdat er nu ook *onder* de horizonlijn voldoende waterdruppeltjes zweven. - Als we ons verplaatsen, beweegt de regenboog met ons mee: hij is geen 'voorwerp', men ziet hem niet op een bepaalde *plaats*, maar in een bepaalde *richting*; men zou kunnen zeggen dat hij zich gedraagt als een oneindig ver verwijderd ding, dat zich met ons mee verplaatst zoals de Maan 'meeloopt'. - Als men vlak bij de wolk van druppels staat, zoals bij het sproeien met de tuinslang, ziet men *twee* regenbogen door elkaar! Hoe komt dat? Sluit afwisselend het éne en het andere oog: het blijkt *dat ieder oog zijn eigen regenboog ziet* (hetgeen uit het meelopen van de regenboog ook volgt). - Dikwijls kan men de nevenregenboog en de overtallige bogen mooi zien. - Verandert de richting van de straal of ziet men de regenboog op andere punten van de wolk, dan verandert de kleurschakering in de boog: de druppeltjes hebben een andere gemiddelde grootte.



PLAAT VIII*a*. Regenboog. De regen valt klaarblijkelijk vóór de bergen; binnen de boog is de hemel helderder dan erbuiten.
Naar Stuchtey in Müller-Pouillet, V, 1, blz. 248, 1928.



PLAAT VIII*b*. Kring of halo om de maan, met bijmanen, bovenraakboog en lichtkruis.
Naar een aquarel van L.W.R. Wenckebach. Cliché in bruikleen van het Kon. Ned. Meteorologisch Instituut.

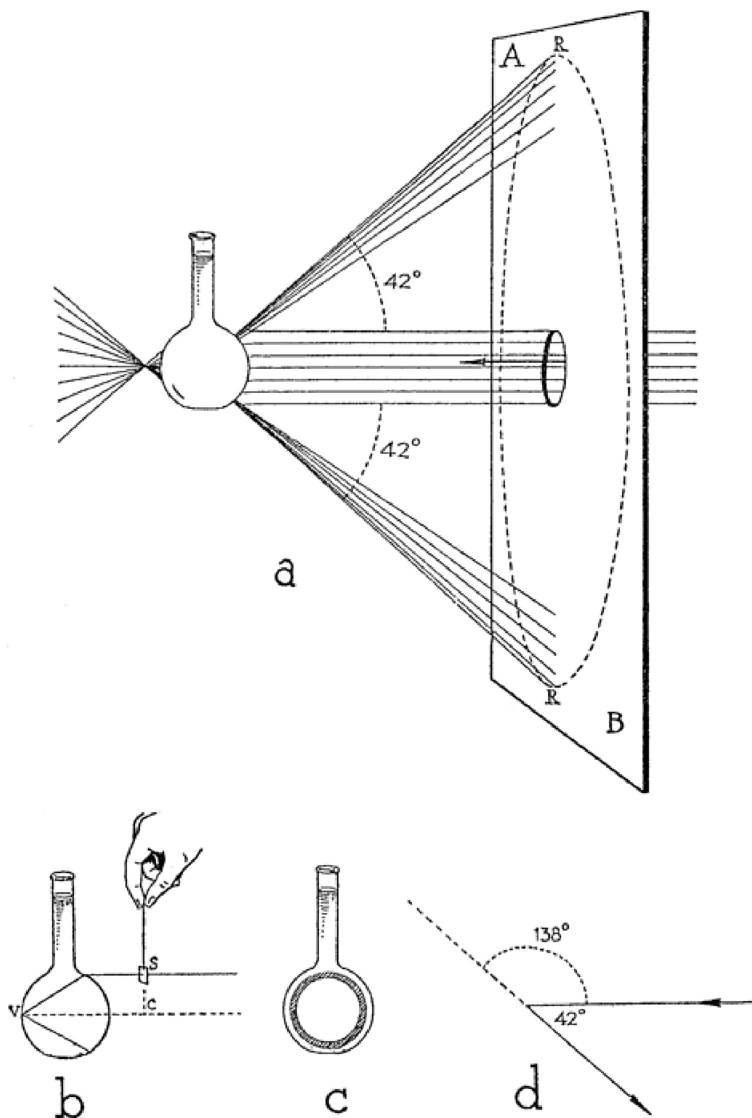



Fig. 111. Nabootsing van de regenboog met behulp van een kookfles met water. (In fig. b moet het punt V iets *boven* de stippellijn liggen).

## 122. Descartes' theorie van de regenboog.

Om te onderzoeken hoe het licht in een waterdruppel loopt, nemen we een kookfles, gevuld met water, en houden die in het zonlicht (fig. 111*a*). Op een scherm AB, waarin we een passende opening gesneden hebben, (iets groter dan de fles) tekent zich nu een zwakke regenboog R af; hij vormt een gesloten kring, zijn hoekafstand is inderdaad ongeveer 42$^{o}$, en hij heeft het rood naar buiten gekeerd net als een echte regenboog!

> De proef lukt ook met een bekerglas of zelfs met een gewoon drinkglas, dat echter min of meer cylindervormig moet zijn. Men werkt dan 's ochtends of 's avonds bij laagstaande zon; op het scherm verschijnt geen cirkel, maar een paar evenwijdige strepen.

Houd vóór de kookfles in S een schermpje dat aan een draadje bevestigd is: er verschijnt een schaduw onder aan de regenboog (fig. 111*b*). Druk de vochtige vinger ergens bij V tegen de kookfles: er verschijnt een donkerder vlek op dezelfde plaats onder aan de regenboog. Blijkbaar wordt de regenboog dus gevormd door stralen die op de afstand SC van de centrale lijn invielen, en die achter in de waterdruppel in V teruggekaatst zijn. Als men een ring van enkele mm breedte

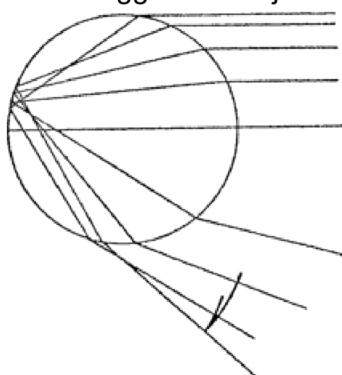


Fig. 112. Het verloop der lichtstralen in een waterdruppel en het ontstaan van de regenboog. De dikke lijn geeft het golfoppervlak aan.

en 0,86 maal de middellijn van de kookfles goed gecentreerd in de invallende bundel houdt, verdwijnt de regenboog geheel en al (fig. 111*c*).

Fig. 112 geeft de nauwkeurige stralengang, berekend uit de gewone wetten der terugkaatsing en der breking. Men ziet dat de lichtstralen, die op de druppel invallen, verschillend sterk afwijken volgens het punt waar ze hem treffen; een van die stralen wijkt het minst van alle af, nl. 138$^{o}$. De uittredende stralen zijn nu over al de verschillende richtingen uitgespreid, alleen die welke de kleinste afwijking ondergaan zijn onderling bijna evenwijdig en bereiken ons oog dus met de grootste ‘dichtheid’.

In een goed donker gemaakte kamer kan men ook de nevenregenboog zich bleek op het scherm zien aftekenen, onder een hoek van 51° met de as, 231° ten opzichte van de invallende stralen afwijkend (fig. 113). Door dergelijke proeven als voor de hoofdregenboog

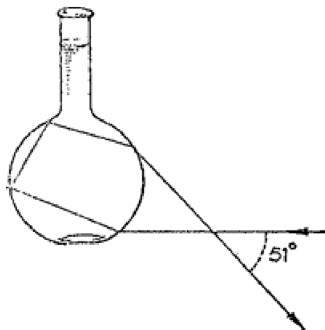



Fig. 113. Het ontstaan van de nevenregenboog.

bewijst men dat hij ontstaan is uit de *tweemaal* teruggekaatste stralen. De volgorde zijner kleuren is de omgekeerde van die van de hoofdboog, net zoals in de natuur.

Denk u nu elk van de druppeltjes ener wolk, aldus veel licht terugkaatsend in een kegelmantel van 42°, en minder in een kegelmantel van 51°. Al de druppels die wij op een hoekafstand van 42° van de invallende zonnestralen zien, liggen net zó dat ze hun eerste regenbooglicht naar ons oog

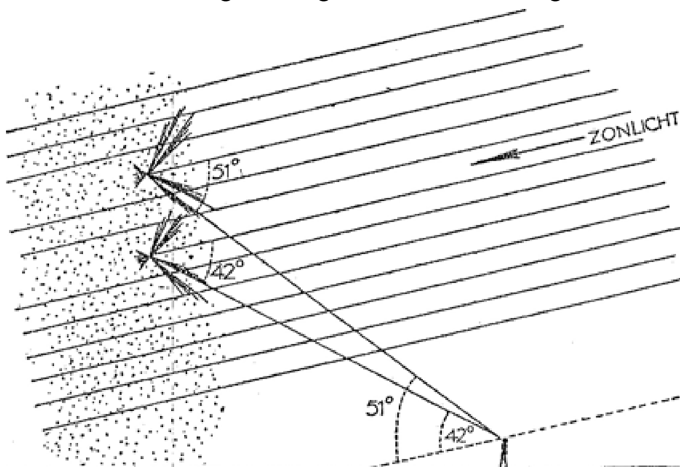



Fig. 114. Zonlicht, dat op een zwerm regendruppels valt, tovert daarin een regenboog en nevenregenboog.

zenden; en die welke wij op 51° afstand zien, zenden ons hun tweemaal teruggekaatste stralen. Zo ontstaan dus voor ons de hoofd- en de nevenregenboog (fig. 114).

## 123. De buigingstheorie van de regenboog.

Bij de theorie van Descartes werd alleen gedacht aan de minst afwijkende stralen, alsof die er alleen waren. In werkelijkheid zijn er echter ook een aantal die meer afwijken, en die samen door een gebogen *brandlijn* worden omhuld. Dat zijn nu juist de omstandigheden waaronder *interferentie* optreedt, zoals wij het hebben gezien nabij de brandlijnen van regendruppels op een lorgnetglas (§ 118). En vooral wanneer de druppels klein worden, komt men er niet meer met *lichtstralen* te beschouwen, maar moet men het *golfoppervlak* onderzoeken, dat in de nabijheid van zulk een brandlijn een *omkeerpunt* vertoont (fig. 112).

Dit golfoppervlak beschouwt men volgens het beginsel van Huygens als de stralingsbron die het licht uitzendt, en onderzoekt hoe de trillingen die van elk deel ervan in ons oog samenkomen onderling interfereren. Deze rekening, uitgevoerd door Airy, aangevuld en toegepast door Stokes, Möbius, Pernter, leidt tot de beroemde regenboogintegraal

$$A = c \int_0^\infty \cos\frac{\pi}{2}\,(u^3 - zu)\,du$$

, die de amplitude aangeeft van het licht dat ons oog treft, als functie van de hoek *z* met de richting der minstafwijkende stralen. Die integraal wordt door reeksontwikkeling berekend, en de lichtsterkte die we in een richting *z* zien is dan eenvoudig gegeven door $A^2$.

In fig. 115 ziet men hoe de lichtverdeling die we bij grote druppels gevonden hadden (*a*), bij kleine druppels door de buiging

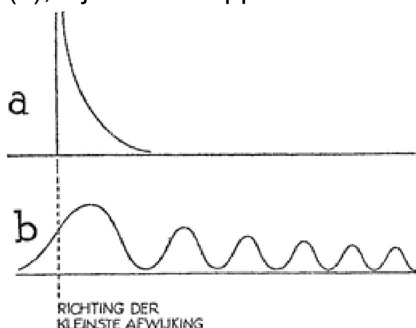



Fig. 115. Lichtverdeling in de stralenbundel die uit een waterdruppel komt: *a.* volgens de eenvoudige theorie van Descartes; *b.* volgens de buigingstheorie.

gewijzigd wordt (*b*). De minstafwijkende stralen bij *z* = *o* bepalen nog wel in hoofdzaak het verschijnsel, maar er zijn een aantal zwakkere maxima ontstaan.

Nu moet men dergelijke krommen afzonderlijk tekenen voor een aantal kleuren; voor elke afwijkingshoek *z* krijgt men dus een mengsel, de kleuren van de regenboog zijn dus nooit echt verzadigde tinten. Aangezien het eerste en sterkste maximum van elke kleur de hoofdrol speelt, en die hoofdmaxima bij toenemende golflengte geleidelijk verschuiven, zien wij de regenboogkleuren in grote trekken zoals dit uit de elementaire theorie zou volgen. De

wijzigingen door de buiging bestaan daarin, *dat de kleuren er ietwat anders uitzien volgens de grootte van de druppeltjes*, en *dat er aan de binnenzijde van de boog overtallige bogen verschijnen*. Tenslotte is nog te bedenken, dat de zon geen punt is, en dat dus de zonnestralen niet streng evenwijdig zijn (§ 1), zodat ze door hun spreiding over een hoek van ruim een halve graad de regenboogkleuren ietwat uitwissen.

Volgens de buigingstheorie is het mogelijk, bij het zien van een regenboog onmiddellijk aan te geven hoe groot ongeveer de druppeltjes zijn waarin hij gevormd wordt. De voornaamste kenmerken zijn de volgende.

| ***middellijn.*** | |
|---|---|
| 1-2 mm | Zeer helder violetrose en levendig groen; de boog bevat verder zuiver rood maar bijna geen blauw. Overtallige bogen talrijk (5 bv.), zonder onderbreking bij de hoofdboog aansluitend, afwisselend violetrose en groen. |
| 0,50 mm | Het rood is veel zwakker geworden. Minder overtallige bogen, nog afwisselend violetrose en groen. |
| 0,20-0,30 mm | Geen rood meer; overigens is de regenboog breed en goed ontwikkeld. Overtallige bogen vertonen een meer en meer gele kleur; verschijnt er een onderbreking tussen de overtallige bogen, dan is de middellijn 0,20 mm; als de onderbreking tussen hoofdboog en eerste overtallige boog komt te liggen is de middellijn < 0,20 mm. |
| 0,08-0,10 mm | De boog nog breder, bleker, alleen het violet is mooi. De eerste overtallige boog is flink gescheiden van de hoofdboog en vertoont duidelijk witte tinten. |
| 0,06 mm | De hoofdregenboog bevat reeds een duidelijke witte streep. |
| < 0,05 mm | Nevelboog (vgl. § 128). |

## 124. De lucht om de regenboog.[1]

Wie aandachtig waarneemt, zal opmerken dat de lucht donkerder is tussen de twee regenbogen dan daarbuiten. Natuurlijk is er een wolkenachtergrond die van plaats tot plaats een ietwat

1) Nat. **109**, 309, 1922.

veranderlijke helderheid heeft, maar gemiddeld is het effekt toch duidelijk zichtbaar (plaat VIII*a*).

Verklaring: naast de stralen die het minst afwijken, kaatst iedere druppel ook stralen terug in allerlei sterker afwijkende richtingen. In fig. 114 zijn die zwak aangegeven; merk op dat deze stralen voor de nevenregenboog juist naar de *andere* zijde afwijken dan voor de hoofdregenboog. De waarnemer zal dus nog zwak diffuus licht krijgen van de hemel binnen de eerste

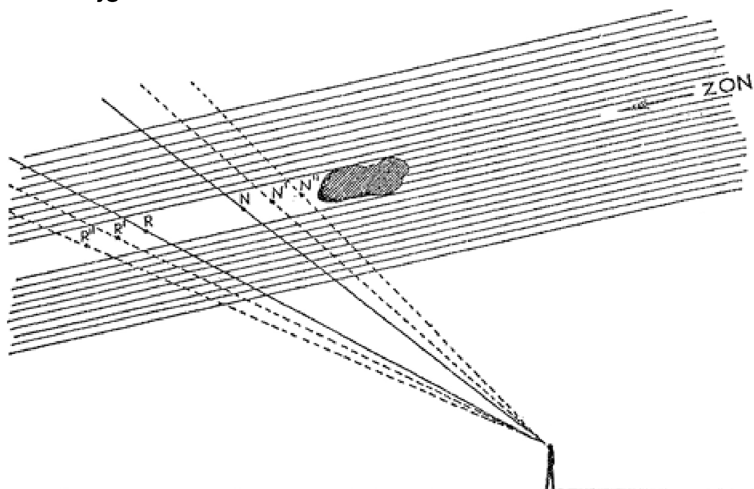



Fig. 116. Wolkenflarden tussen de zon en de regenbui veroorzaken een straalsgewijze streping van de lucht.

regenboog, wegens de éénmaal teruggekaatste stralen die meer dan 138° afwijken, dus onder *minder* dan 42° met de as lopen; en ook zwak licht van de hemel buiten de tweede regenboog, wegens de tweemaal teruggekaatste stralen die meer dan 231° afwijken, dus onder *meer* dan 51° met de as lopen.

*Niet liefde geeft het klaarste inzicht, neen.*
*Het is uit tranen, tranen ongeschreid,*
*Dat hoog opstijgt de Regenboog der Smart:*
*Binnen zijn welving is het helderst licht.*
*Fiona Mac Leod: The divine Adventure.*

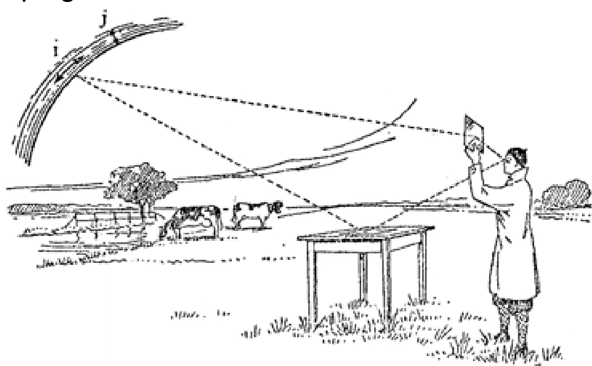
Soms ziet men een straalsgewijze struktuur in die diffuse lichtschijn.[1] Ze herinnert aan schemeringbundels en aan de

1) S. Thompson, Nat. **18**, 441, 1878.

stralenbundels in bewogen water (§191 en 217). Dit verschijnsel is gemakkelijk te verklaren als we ons voorstellen dat er ergens tussen de zon en de regendruppels een wolkje zweeft (fig. 116). Van de druppels in de schaduwzuil achter het wolkje krijgt de waarnemer geen licht meer; de regenboog, die voor hem bestaat uit licht van al de druppels in de gezichtslijn, mist hier dus de bijdrage van de druppels R; en net evenzo mist de nevenboog het licht van de druppels N, terwijl in het diffuse licht de bijdrage ontbreekt van druppels als R', R", .... en N', N", .... In het vlak oog - zon - wolk zijn dus alle lichtverschijnselen zwakker: er ontstaat een schaduwstraal, waarvan de verlenging door het tegenpunt der Zon gaat.

## 125. Polarisatie van het regenbooglicht.[1)]

Als men beproeft een regenboog weerspiegeld te zien in een stukje glas, kan men een zeer treffende waarneming doen. De proef gelukt niet met een echte (verzilverde) spiegel, maar wel




117. Het waarnemen van de polarisatie van het regenbooglicht.

met gewoon glas, liefst donker of althans voorzien van een stukje zwart papier aan de onderkant. Men houdt het plaatje vrij dicht bij zijn oog, en zò, dat de blik nogal schuin invalt (60$^{\circ}$ met de normaal bijvoorbeeld). Maar dat kan nu nog op verschillende manieren geschieden: ik kan het plaatje waterpas houden, of ik kan het vertikaal houden (fig. 117). Als we in 't bijzonder op

1) F. Rinne, Naturwiss. **14**, 1283, 1926.

de top van de regenboog letten, zullen we zien dat hij in het eerste geval heel duidelijk en lichtsterk weerspiegeld wordt, in het tweede geval zo zwak, dat hij bijna onzichtbaar is. Het licht van de regenboog heeft dus zijdelingse eigenschappen, het is 'gepolariseerd'.

De waarneming geschiedt nog gemakkelijker, als we de regenboog bekijken door een *nicol*, een toestelletje dat onmiddellijk toelaat te onderscheiden of het licht polarisatie vertoont. Men draait de nicol om zijn as: bij de ene stand is de regenboog zeer helder, bij de andere zeer zwak. We kunnen het licht van de regenboog samengesteld denken uit licht dat in de richting *i* trilt en uit licht dat in de richting *j* trilt; de verhouding der lichtsterkten *i:j* blijkt dan ongeveer 21:1 te zijn, de polarisatie is zeer sterk. Bij de nevenregenboog is het verschijnsel niet zo uitgesproken, maar toch nog zeer duidelijk: de verhouding is hier 8:1. Beide resultaten kloppen met de theorie.

## 126. Invloed van bliksemontladingen op de regenboog.

Een merkwaardige waarneming werd gedaan door V.J. Laine.[1)] Telkens als het donderde, merkte hij op dat de grenzen der kleuren van de regenboog uitgewist werden. Vooral in de overtallige bogen was er verandering op te merken: de tussenruimte tussen 't violet en de eerste overtallige boog verdween, het geel werd helderder. 't Was alsof de hele regenboog trilde. - Volgens de tabel § 123 wijzen deze veranderingen op een groter worden van de druppels.

Het optisch effekt ontstond niet op het ogenblik van *de bliksem*, maar verscheiden sekunden later, als 't geluid van de donder aankwam. Men zou zich kunnen voorstellen dat door de luchttrilling de druppeltjes neiging vertoonden om samen te vloeien; deze werking is echter zo gering, dat een merkbare invloed onwaarschijnlijk lijkt. Ook is mogelijk dat de elektrische ontlading de oppervlaktespanning van de druppeltjes wijzigt, zodat ze gemakkelijker samenvloeien; dat de tijd die daarvoor nodig is samenviel met de tussenruimte van bliksem en donder zou dan echter een toeval zijn.

## 127. De rode regenboog.

In de laatste 5 of 10 minuten vóór zonsondergang kan men zien hoe langzamerhand alle kleuren van de regenboog uitgedoofd

1) Phys. Zs. **10**, 965, 1909.

worden, op het rood na; er blijft tenslotte een éénkleurig rode boog over. In bepaalde gevallen kan die verrassend lichtsterk zijn, en soms zelfs 10 minuten na zonsondergang zichtbaar blijven; natuurlijk is het onderste gedeelte van de boog dan afgeschermd, en begint hij maar op enige hoogte boven de gezichteinder. Eigenlijk ontwerpt de natuur hier voor ons een spektrum van het zonlicht, en laat ons zien hoe dit bij zonsondergang van samenstelling verandert. De oorzaak der verandering is de verstrooiing der kortere lichtgolven (§ 171).

## 128. De mistboog of witte regenboog.[1)]

Als de druppeltjes heel klein zijn, gaat de boog er helemaal anders uitzien. Dit is het best waar te nemen als men, zelf op een heuvel staande, de zon achter zich heeft, nevel vóór en onder zich. Men ziet dan de boog als een witte band, wel tweemaal zo breed als een gewone regenboog, waarvan de buitenrand oranje, de binnenrand blauwachtig gekleurd is; aan de binnenzijde ziet men dikwijls, na een tussenruimte, een of zelfs twee overtallige bogen die merkwaardigerwijze de omgekeerde kleurenvolgorde van de normale hoofdboog vertonen (bv. eerst rood, daarbinnen groen).

Deze bijzonderheden kloppen verrassend goed met wat de theorie berekent voor druppeltjes met een straal van 0,025 mm. en kleiner (vgl. § 123). Bij deze zeer kleine druppeltjes blijft de straal van de regenboog geen 42$^{\circ}$ meer, maar begint af te nemen; en aangezien 'klein' hier betekent: 'klein t.o.v. de golflengte', zal het effekt uitgesprokener zijn voor de rode stralen dan voor de blauwe. Vandaar dat in het rood de overtallige boog al zoveel verkleind is, dat hij zelfs voorbij de blauwe schiet en er binnen komt te liggen.

Wie het zeldzaam mooie verschijnsel ziet, voere ook enige metingen uit om de middellijn $2\vartheta$ der bogen (in graden) te bepalen (vgl. § 235). Het scherpst is de donkere ring te meten tussen hoofdboog en eerste overtallige boog; hieruit is dan de straal *a* der druppeltjes (in mm) te berekenen met behulp der formule:

$$a = \frac{0{,}31}{(41^{\circ}44' - \vartheta)^{3/2}}.$$

(Neemt men 't gemiddelde tussen de blauwe en de oranje rand van de hoofdboog, dan wordt de constante in de teller 0,18).

1) Phil. Mag. **29**, 456, 1890. - E. van Everdingen, Hemel en Dampkring, **30**, 19, 1932.

Vgl. nog § 165.

Merkwaardigerwijze is de nevelboog nog bij uiterst lage temperaturen gezien (-34$^{o}$!), hetgeen bewijst dat waterdruppeltjes in de dampkring sterk onderkoeld kunnen zijn.[1] Soms is de nevelboog waargenomen bij een zó ijle nevel, dat de waarnemer beweerde dat er geen nevel was!

Men ziet bijna altijd een nevelboog, als de felle bundel van een zoeklicht in de mist dringt en men de rug naar het zoeklicht keert. Zelfs gewone straatlantarens doen hem *dikwijls* ontstaan, zij het ook zwak, en alleen tegen een goed donkere achtergrond zichtbaar.[2] Tyndall zag hem met een kaarsvlam als lichtbron[3]! Als de nevel gezien wordt tegen de donkere aarde of de donkere hei als achtergrond, kan men soms de hele nevelboog als gesloten cirkel waarnemen; de paar meter nevel tussen ons oog en de grond vóór onze voeten zijn dus al voldoende om het verschijnsel te vertonen.[3]

Een enkele maal is een *dubbele* nevelboog waargenomen.[4]

## 129. De dauwboog of horizontale regenboog.

Op een herfstmorgen kan men de hei bedekt zien met miljoenen spinnewebbetjes, die anders niet opvallen, maar nu

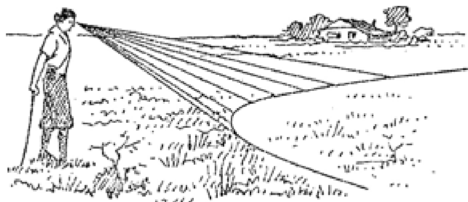


Fig. 118. De dauwboog.

besprenkeld zijn met dauwdruppeltjes en in de zonnestralen oplichten (vgl. § 28). Men treft het dan soms, dat een regenboog zich in die lichtspelingen aftekent, vóór ons op de grond, niet als een kring, maar als een wijd geopende *hyperbool* (fig. 118).

De verklaring is niet moeilijk te vinden: ons oog krijgt licht uit alle richtingen die een hoek van 42$^{o}$ met de as zon-oog vormen; deze kegel snijdt het oppervlak van de grond in een hyper-

1) Ch.F. Brooks, M.W.R. **53**, 49, 1925. -. G.C. Simpson, **38**, 291, 1912, vermeldt het verschijnen van een mistboog bij -29$^{o}$ C.
2) Met. Zs. **39**, 33 en 324, 1922. - Hemel en Dampkring, **1**, 349, 1903.
3) Phil. Mag. **17**, 148, 1883. - Hemel en Dampkring, **1**, 349, 1903.
3) Phil. Mag. **17**, 148, 1883. - Hemel en Dampkring, **1**, 349, 1903.
4) Lepper, Hemel en Dampkring, **1**, 1903. - Onweders, enz. **52**, 54, 1931.

boolkurve, zolang de zon laag staat; later op de dag zou het een ellips worden, maar dat schijnt men slechts zelden te hebben gezien. Men kan de kurve door een helper op de grond laten afbakenen en uitmeten; met behulp van de tijd der waarneming en de daaruit berekende zonshoogte kan men dan berekenen dat de kurve inderdaad een hyperbool is, en bij een kegel met een halve tophoek van $42^o$ past.[1] Merk op dat de breedte van de gekleurde band toeneemt, hoe verder hij van ons oog verwijderd is. In een heel enkel geval heeft men ook de nevenregenboog en de overtallige bogen in de dauw waargenomen.[2]

Andere omstandigheden waarin de dauwboog gezien is:

1. op een vijver, bedekt met eendenkroos[3]; op een grasperk;
2. op een vijver met olieachtig oppervlak, waarop dauwdruppels kunnen liggen *zonder zich met het water te vermengen*; zulk een oppervlak kan bv. ontstaan door de rookwalm van fabrieken. In een bepaald geval waren de druppeltjes 0,1 tot 0,5 mm groot, 20 druppeltjes per $cm^2$ gaven al een duidelijk zichtbare dauwboog[4];
3. op een meer of op zee, 's ochtends vroeg, als de lucht afgekoeld is maar het water nog warm, zodat er een dunne nevel over het wateroppervlak drijft; dikwijls is dan niet de hele boog te zien, maar alleen de twee uiteinden;
4. op een ijsoppervlak dat zich met goedgevormde dauwdruppels schijnt te kunnen bedekken (- hoe is dat mogelijk? -)[5].

Aan deze waarneming is er nog een merkwaardige psychologische zijde. Waarom zien we eigenlijk de regenboog *cirkelvormig*, de dauwboog *hyperbolisch*, terwijl in beide gevallen toch de lichtstralen in dezelfde richting in ons oog vallen? - ‘Het is een kwestie van het combineren van waarneming en verwachting. Bij een dauwboog zijn we onder de invloed van de gedachte, dat het lichtverschijnsel in een horizontaal vlak uitgespreid is; en we stellen ons onbewust de vraag: *hoe moet de ware vorm van de lichtkromme op het gras zijn, opdat wij het verschijnsel zouden zien zoals wij het zien*? Het antwoord is natuurlijk: een ellips, of in andere gevallen een hyperbool. Maar als integendeel de vraag luidt: *hoe zien we de dauwboog*? - dan hangt ons antwoord af van de waarneming gecombineerd met de interpretatie ervan.

1) A.E. Heath, Nat. **97**, 6, 1916.
2) W.J. Humphreys, Journ. Frankl. Instit. **207**, 661, 1929.
3) Hemel en Dampkring, **6**, 145, 1908.
4) Nat. **43**, 416, 1891.
5) Cl. Maxwell, Papers, II, 160. - Sitzungsber. Akad. Wien, **119**, 1057, 1910.

Zagen we alleen het lichtverschijnsel, en wisten we niets over zijn ontstaan, dan zouden we nooit aan anders dan aan cirkelvormigheid denken' (Stokes). - De stereoskopische schatting van de afstand van individuele druppeltjes of groepjes druppels zal stellig meehelpen om de dauwboog in het horizontale vlak te lokaliseren (vgl. § 153).

Weerspiegelde dauwboog: zie § 131.

## 130. Weerspiegelde regenbogen.

Een regenboog, die wij in de richting van het punt A ener wolk zien, vertoont zich tegenover een ander punt B wanneer

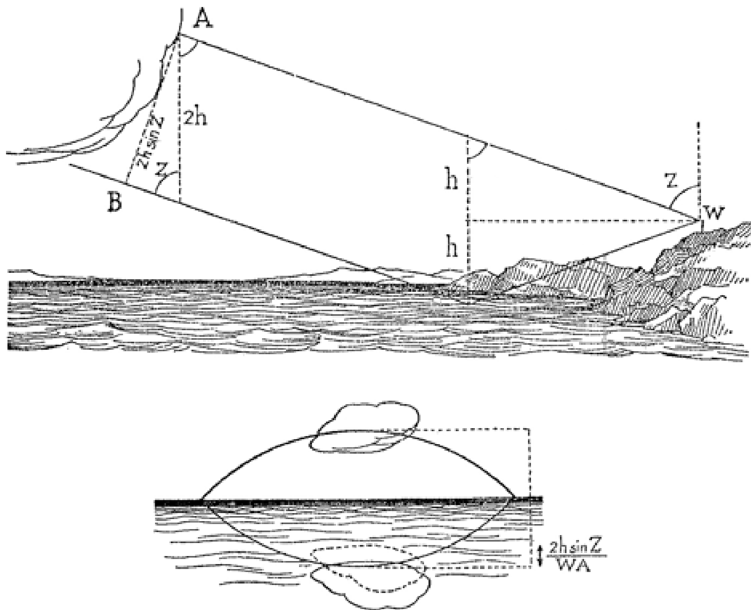



Fig. 119. De weerspiegelde regenboog.

wij het landschap in rustig water weerspiegeld zien (fig. 119). Dat komt door het reeds hoger opgemerkte feit, dat de regenboog zich niet in het vlak van de wolken 'bevindt' maar dat hij als

't ware oneindig ver verwijderd is. Eigenlijk is het dus de regenboog die een t.o.v. de horizon volmaakt symmetrisch spiegelbeeld geeft; en het is de wolk die verschoven is. De verschuiving wordt pas goed merkbaar, als we ons op enige hoogte *h* boven de waterspiegel bevinden; we kunnen zelfs uit een schatting der verschuiving in hoekmaat de afstand WA van de wolk uitrekenen: hoekverschuiving

$$= \frac{2h \sin z}{\mathrm{WA}}$$

.

Geheel anders werkt de weerspiegeling als de zonnestralen terugkaatsen *voor* ze

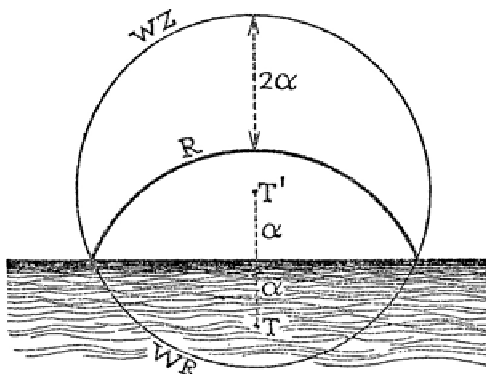



Fig. 120. R = regenboog. - WR = weerspiegelde regenboog. - WZ = regenboog gevormd door de weerspiegelde zon.

deregenboog vormen. Dan verschijnt een verschoven boog WZ met als middenpunt T', het weerspiegelde tegenpunt T van de zon (fig. 120). Hij is groter dan een halve cirkel; de afstand tussen de toppen der twee bogen is gelijk aan de hoek tussen T en T', dus tweemaal *a*, de hoogte der Zon boven de gezichteinder. Dikwijls ziet men maar een stukje van de verschoven boog, bijvoorbeeld de top of de uiteinden; bij buitengewone regenbogen is het dus zaak allereerst aan de mogelijkheid van een dergelijke weerspiegeling te denken. Overweeg waar er in de buurt grote waterplassen zijn, uit wier ligging men begrijpen kan dat slechts een deel van de verschoven boog waargenomen wordt.

De twee door terugkaatsing ontstane bogen vullen elkaar aan tot een gesloten cirkel (fig. 120).

## 131. De weerspiegelde dauwboog.[1)]

Ook de dauwboog kan zich weerspiegelen in het water: de mooigekleurde hyperbool, gevormd door de druppeltjes die op

1) Sitzungsber. Akad. Wien, **119**, 1057, 1910. - W.J. Humphreys, Journ. Frankl. Instit. **207**, 661, 1929.

het oppervlak zweven, is dan *dubbel*. Dat de zwakste der twee bogen door terugkaatsing ontstaat, wordt zeer duidelijk als men

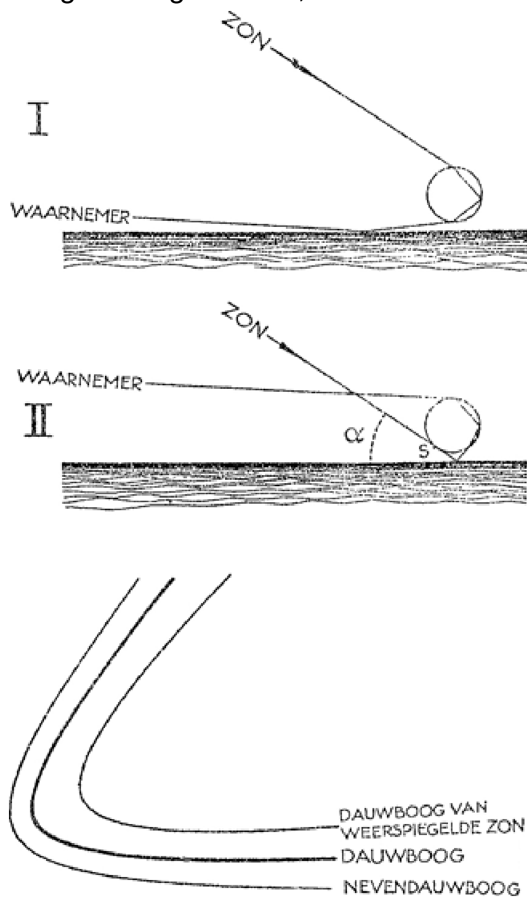



Fig. 121. Weerspiegelde dauwbogen. - I = de dauwboog wordt weerspiegeld. II = de weerspiegelde zon vormt een dauwboog.

toevallig de dauwboog op een ijsoppervlak kan waarnemen: die tweede boog is dan verdwenen!

De hoekafstand der bogen is weer 2 maal de zonshoogte. Doordat zich nu echter de druppeltjes op het wateroppervlak zelf

bevinden, is het hier niet zonder meer mogelijk uit te maken of de weerspiegeling gebeurd is vóór- of nàdat de lichtstralen door de waterdruppels gegaan zijn; beide gevallen zouden *dezelfde* hyperbool geven (vgl. fig. 121; in beide figuren stijgt de teruggekaatste straal onder een hoek $42^{o}$ - *a* op).

Het gelukt echter twee criteria te vinden, *voor het geval dat de zon vrij hoog staat* ($21^{o}$ tot $42^{o}$).

*a*. Van de teruggekaatste boog ontbreekt het gedeelte nabij de top. Verklaring: bij stralengang II wordt de invallende stralenbundel door de druppel zelf in S ten dele afgeschermd, vóór hij weerspiegelt en dan in de druppel binnendringt. Bij de andere stralengang I komt die kenmerkende bijzonderheid niet voor.

*b*. Als ik twee naburige punten van de twee bogen met een nicol bekijk, vind ik dat de trillingsrichtingen van het licht sterk verschillend zijn en in 't algemeen niet horizontaal; men kan aantonen dat dit slechts het geval zal zijn als de terugkaatsing vóór de brekingen gebeurt.

Blijft de vraag: waarom vertonen de lichtstralen een voorkeur voor het *eerst* terugkaatsen? Het antwoord is eenvoudig, dat bij de stralengang I de uittredende stralen te vlak lopen en door de naburige druppels onderschept worden.

*Als de zon laag staat* zullen de lichtstralen éérst door de druppel dringen en dàn weerspiegeld worden; de top van de weerspiegelde boog wordt weer afgeschermd, maar de polarisatie is anders. Dit geval is nog niet aandachtig bestudeerd.

## 132. Afwijkende regenboogverschijnselen.[1)]

Hier volgen nog enige figuurtjes van uitzonderlijke regenboogvormen, ten dele door weerspiegeling in watervlakken ontstaan,

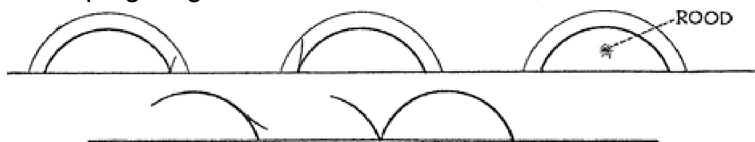



Fig. 122. Afwijkende regenboogverschijnselen.

maar waarvoor geen verklaring bestaat die mijns inziens bruikbaar is. Reden te meer om naar dergelijke verschijnselen te zoeken! Let vooral op, wáár de abnormale bogen hun rode en violette zijde hebben!

1) Onweders, enz. **21**, 54, 1900. **24**, 160, 1903. **29**, 110, 1908. - Hemel en Dampkring **27**, 359, 1929.

## 133. Maanregenboog.

De maan vormt evengoed regenbogen als de zon, maar natuurlijk zijn deze maanregenbogen zeer lichtzwak. Vandaar dat ze bijna alleen bij *volle* maan opgemerkt worden, en dat men ze maar zelden gekleurd ziet, - zoals in 't algemeen 's avonds de zwak verlichte voorwerpen kleurloos schijnen (§ 77).

Niet verwarren met halo's! De regenboog is altijd *aan de tegenovergestelde kant van de maan* te zien!

De straal van de maanregenboog is soms heel nauwkeurig te bepalen als er toevallig een heldere ster in de nabijheid zit. Vgl. § 135.

## ***Kringen*.**

## 134. Algemene beschrijving van de haloverschijnselen.[1)]

Het is enige dagen lang helder, mooi lenteweer geweest, maar nu daalt de barometer en de wind gaat uit het zuiden blazen. Van 't westen komen de hoge, ijle veerwolken aandrijven, langzamerhand wordt de lucht melkwit, opaliserend door cirrostratussluiers. De zon schijnt als door matglas, haar omtrek is niet meer scherp begrensd maar vloeit geleidelijk uit. Er hangt een eigenaardige troebele belichting over het landschap: ik ‘voel’ dat er een halo om de zon moet zijn!

En meestal komt het inderdaad uit. Een lichte kring van ruim $22^{o}$ straal tekent zich om de zon af; men ziet hem het best als men in de schaduw gaat staan van een huis, of de hand voor de zon houdt om niet teveel verblind te worden (§ 160). Het is een groots verschijnsel! Reusachtig schijnt die kring voor wie hem het eerst ziet - toch is het ‘de kleine kring’, de andere haloverschijnselen ontwikkelen zich op nog ruimer schaal. Steek de arm uit en strek de vingers der hand wijd uit elkaar: dan ziet u de afstand tussen de toppen van duim en pink ongeveer even groot als de straal van de zonnekring (vgl. § 235).

Een dergelijke kring kunt u ook om de maan zien. Ik bedoel niet een *krans* van een paar graden middellijn en met het rood binnen, het blauw buiten; maar dezelfde grote kring die we daareven als zonnekring beschreven. - Eénmaal is het gelukt tegelijk

1) Voor alles wat halo's betreft raadplege men het boek van R. Meyer: Die Haloerscheinungen (Hamburg, 1929). - Zie ook M. Pinkhof, Verh. Akad. Amsterd. **13**, No. 1, 1919.

een kring te zien om de ondergaande zon en een kring om de opgaande volle maan!

Denk niet dat zulke kringen zelden waar te nemen zijn. Men kan aannemen dat een geoefend waarnemer, die de hele dag uitkijkt, er in onze gewesten gemiddeld één in de 4 dagen kan zien, in April en Mei één in de 2 dagen; de beste waarnemers zien halo's op 200 dagen per jaar! Is het dan niet ongelofelijk dat er zoveel mensen zijn die nooit een kring om de zon hebben opgemerkt?

Naast de kleine kring ontwikkelen zich dikwijls nog verschillende andere lichtbogen en lichtvlekken, die elk een naam hebben gekregen en die alle

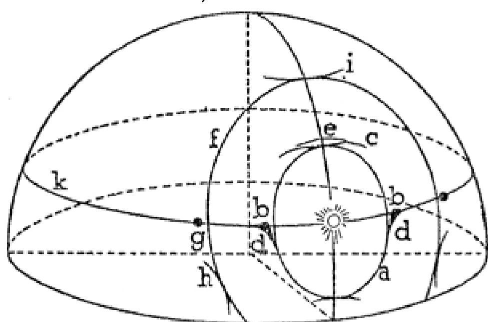



Fig. 123. Enkele der belangrijkste haloverschijnselen, schematisch voorgesteld.

samen het haloverschijnsel vormen; de voornaamste zijn in fig. 123 geschetst, alsof zij zich aftekenden op een denkbeeldige hemelbol. Wij zullen deze nu achtereenvolgens kort bespreken maar merken nu reeds op, dat er gewoonlijk maar enkele daarvan tegelijk waarneembaar zijn. De meeste zijn alleen bij de zon gezien; bij de maan zijn ze veel lichtzwakker, kleuren zijn dan bijna niet te onderscheiden[1)] (vgl. § 77, 133). Gewoonlijk vormen ze zich in cirrostratussluiers of in cirri, zelden in cirrocumuli of altocumuli; in onweerscirri kan men ze te zien krijgen, maar niet dikwijls. *Alle wolken die halo's geven bestaan uit ijskristalletjes*, en de regelmaat der vormen van die ijskristalletjes is het, die de mooie symmetrie der lichtverschijnselen veroorzaakt. Dat echter zoveel ijswolken geen kringverschijnselen vertonen, is dààraan te wijten, dat sneeuwsterretjes en bolvormig samengevoegde kristallen niet de goede vorm hebben om het licht op de wijze van een prisma te breken; en dat bij te kleine kristalletjes buiging de haloverschijnselen uitwist.

1) C.A. van den Bosch, Natuurk. Tijdschr. voor Ned. Indie, **92**, 39, 1932, zag verscheiden maanhalo's gekleurd.

Het fotograferen van halo's heeft wetenschappelijk belang: het kan leiden tot nauwkeurige hoekmetingen en tot bepalingen van de lichtsterkte; maar daartoe moet de plaat zuiver loodrecht op de as van de camera staan, en de afstand plaat - objectief nauwkeurig bekend zijn. Gebruik een objektief met grote hoek, panchromatische platen met anti-halo laag en geelfilter; wellicht gaat het ook op lantarenplaatjes. Belichtingstijd met sterk geelfilter en *f*/12: ongeveer 0,01 sec.

## 135. De kleine kring (fig. 123*a*; Plaat VIII*b*).

Het is het meest voorkomend haloverschijnsel. Niet altijd is de kring volledig, als nl. de cirrostratuswolken ongelijkmatig over de hemel verdeeld zijn; meestal is hij onder, boven, rechts of links sterker dan in de tussengelegen richtingen. De binnenwand is vrij scherp begrensd en rood gekleurd, dan volgt geel, groen, en een blauwachtig uitlopend wit. De straal van de kleine kring kan men meten met een der middelen aangegeven in § 235, liefst van het centrum van de zon tot aan de rode binnenrand; de beste metingen geven 21°50'.

's Nachts is de straal van de kring om de maan soms zeer nauwkeurig te bepalen als men de stand van een bepaalde ster opmerkt, die bv. met de binnenrand of met het helderheidsmaximum van de halo samenvalt.[1] Het is dan voldoende de naam van de ster op te tekenen (desnoods met een ster-atlas identificeren), en de tijd op te nemen. Naderhand kan ieder sterrekundige dan onmiddellijk berekenen hoever de twee hemellichamen op dat ogenblik van elkaar verwijderd waren (vgl. fig. 126*b*).

Merk op hoe de hemel binnen de kleine kring er dikwijls donkerder uitziet dan daarbuiten; soms schijnt het niet uit te komen, maar alleen omdat de halo gesuperponeerd is op een lichtvlek die geleidelijk van de zon naar buiten in helderheid afneemt. Dit verschijnsel herinnert levendig aan wat we bij de regenboog hebben opgemerkt (daar was de hemel tussen de twee bogen donker); en het ontstaat op dergelijke wijze.

De kleine kring ontstaat door breking van het zonlicht in een wolk van ijskristalletjes, waarvan bekend is dat ze dikwijls de vorm hebben van een zeskant prisma. In elke blikrichting zweven er ontelbare dergelijke prisma'tjes in alle mogelijke oriënteringen

1) C.A. van den Bosch, Natuurk. Tijdschr. voor Ned. Indie, **92**, 39, 1932; de schrijver gebruikt zelfs nog sterren van de 6e grootte!

(fig. 124). Zulk een 6-zijdig prisma breekt het licht alsof het een brekende hoek van $60^{\circ}$ had: al naar zijn oriëntering t.o.v. de invallende stralen zal het hen meer of min doen afwijken,

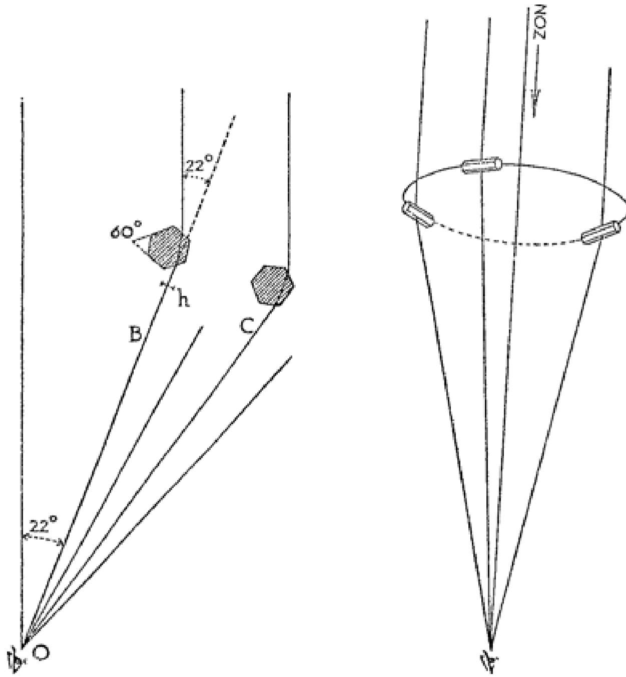



Fig. 124. Het ontstaan van de 'kleine kring.'

maar bij symmetrische stralengang zal er een *kleinst mogelijke afwijking* D zijn, te berekenen uit de bekende formule[1)]

$$n = \frac{\sin \frac{A + D}{2}}{\sin \frac{A}{2}}.$$

Voor A = $60^{\circ}$ en een brekingsaanwijzer $n$ = 1,31 wordt D = $22^{\circ}$: dat is precies de straal van de kleine kring!

1) Ze staat in ieder leerboek der natuurkunde, bij de 'minimum-deviatie van een prisma.'

En inderdaad, men ziet gemakkelijk in (evenals bij de regenboog), dat de stralen OB die de kleinste afwijking ondergaan verreweg de grootste helderheid aanbrengen, omdat bij die stand de richting van de gebroken lichtstraal slechts zeer langzaam verandert als het prisma draait; er zijn dus betrekkelijk veel meer ijskristalletjes die in de buurt van die richting licht naar ons oog zenden, dan in de buurt van andere richtingen. Onze berekening gold ongeveer voor de gele stralen; voor 't rood is de minimumafwijking iets kleiner, voor blauw iets groter: de kring zal dus aan de binnenzijde rood, aan de buitenzijde blauw zijn. Daar nu echter de stralen OC met een grotere afwijking dan het minimum ook enig licht aanbrengen, zullen de groene en blauwe ‘minimum-stralen’ vermengd zijn met wat geel en rood licht, dus een bleke kleur vertonen. Buiten de kring zal men overal nog wat licht zien, maar binnen de kring niet - hetgeen wij al hadden waargenomen; de scherpe binnenrand en de wazige buitenrand zijn tevens verklaard. Zodra de kristalletjes echter niet volgens het toeval over allerlei verschillende richtingen verdeeld zijn, maar bepaalde *voorkeursstanden* innemen, ontstaat er tekening in de lichtschijn buiten de kleine kring, en vertonen zich daarin bepaalde lichtvlekken of bogen, die we straks verder zullen onderzoeken.

Laten we echter eerst nog de vraag bespreken of de *buigingsverschijnselen* bij de halo niet evengoed een rol spelen als bij de regenboog.[1)] Theoretisch moèt dit zo zijn; het ijskristal laat slechts een lichtbundeltje door van breedte *h* (fig. 124), en buigt dus de lichtgolven op dezelfde wijze als een spleet van breedte *h* dit zou doen. Zeer kleine ijskristalletjes zouden evengoed een witte halo geven met rode rand, als kleine druppeltjes een nevelboog (§ 128). Ook kan men verwachten, naast de kleine kring overtallige bogen te zien ontstaan (§ 123), die ook werkelijk wel eens gezien zijn; maar de berekening leert, dat ze zwakker moeten zijn dan bij de regenboog, en zowel aan de buitenkant als aan de binnenkant van de kring gevormd worden - die aan de binnenkant zijn 't best te zien, aangezien ze zich op een donkere achtergrond aftekenen. Er zijn in de waarnemingen aanwijzingen voor veranderlijkheid van de kleuren en van de breedte van de kleine kring; meer waarnemingen zijn zeer gewenst! De kleuren zijn dikwijls het best te beoordelen door een grauw glas; schat de

1) Visser, Versl. Akad. Amsterd. **25**, 1328, 1917; **27**, 127, 1918. - Samenvatting in Hemel en Dampkring, **15**, 17, 1917 en **16**, 35, 1918.

breedte van elke kleur en van het geheel! Noem ze eerlijk en zonder vooroordeel! Noemen twee waarnemers de kleuren van éénzelfde halo wel gelijk? Rood en oranje worden dikwijls verward; groen, blauw en violet onderling ook; merk op hoe zelden geel bij haloverschijnselen optreedt!

Volgens de eenvoudige brekingstheorie zou er praktisch geen blauw in de kleine kring mogen voorkomen, en helemaal geen violet, en ditzelfde moest ook gelden voor bovenraakboog en bijzonnen (vgl. § 136). De waarneming leert echter dat in sommige gevallen het blauw zeer duidelijk kan optreden, vooral in de bovenraakboog en de bijzonnen, die altijd levendige tinten vertonen. De buigingstheorie verklaart nu, hoe blauw en violet kunnen verschijnen, als de grootte der kristalletjes maar de juiste is, en zij verklaart ook waarom de raakboog en de bijzonnen sterker gekleurd zijn dan de kleine kring. Tenslotte maakt de buigingstheorie ons begrijpelijk dat de kleuren nu eens het levendigst zijn in de kleine kring, dan eens in de grote kring: de kleine kring is sterker gekleurd, als de zijvlakken der prisma's waarin de breking geschiedt breed zijn, zoals bij *plaatvormige* kristalletjes; als echter de zijvlakken smal zijn, zoals bij *zuilvormige* kristalletjes, is de kleine kring bleek en de grote meer gekleurd.

Het licht van de kleine kring is gepolariseerd.[1] In tegenstelling met de regenboog zijn de trillingen hier sterker loodrecht op de kring dan evenwijdig aan de kring; wat ook begrijpelijk is, aangezien hier geen terugkaatsing, en alleen twee brekingen voorkomen. Het effekt is echter op verre na niet zo uitgesproken als het bij de regenboog was.

De kleine kring geldt in de volksmond als verkondiger van regenweer[2]; als men zegt: ‘hoe groter de kring, hoe dichterbij de regen’, bedoelt men dat *de kleine kring* regen aankondigt, *de krans* niet. En inderdaad zijn de cirrostratuswolken dikwijls voorboden van een gebied van lage druk; maar toch schijnt het zeer twijfelachtig of de regenkansen na een halo merkbaar groter zijn dan op een willekeurige dag.

## 136. De bijzonnen van de kleine kring (fig. 123*b*; plaat VIII*b*).

Dit zijn twee heldere lichtvlekken op de kleine kring, op dezelfde hoogte als de zon. Dikwijls is er maar één van de twee goed

1) Busch, gerefereerd in Met. Zs. **7**, 1890.
2) Quart. Journ. 1926, en op veel andere plaatsen.

te zien; andere malen ontbreekt zelfs de kleine kring terwijl de nevenzonnen goed zichtbaar zijn. Deze bijzonnen zijn gewoonlijk zeer lichtsterk; duidelijk rood aan de binnenkant, dan geel, en vervolgens uitlopend in een witblauwe uitgeveegde staart.

Bij nauwkeurige waarneming bevindt men, dat de bijzonnen eigenlijk iets *buiten* de kleine kring staan, en wel des te meer naarmate de zon hoger is; bij zeer hoge zon bedraagt het verschil zelfs verscheidene graden.

De bijzonnen ontstaan, wanneer een groot aantal van de zeskante

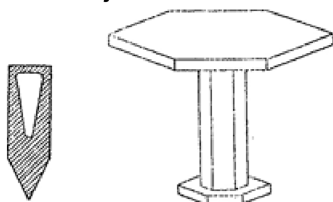


Fig. 125. IJskristalletjes, die bij de vorming van de bijzonnen een belangrijke rol spelen.

ijskristalletjes met hun as vertikaal gericht zijn. Dit is het geval voor langzaam vallende ‘parapluvormen’, of voor ijszuiltjes die aan één uiteinde hol zijn (fig. 125). Door zulke prisma's gaan de lichtstralen van de zon niet meer in de richting der kleinste afwijking, want ze vormen een hoek met het hoofdvlak. Bij zonshoogte *h* is dan de ‘relatief kleinste afwijking’ D', gegeven door de voorwaarde:

$$\frac{\sin \frac{A + D'}{2}}{\sin \frac{A}{2}} = \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 h}{1 - \sin^2 h}};$$

het is dus alsof voor de schuine stralen de brekingsaanwijzer van het ijs groter geworden was (vgl. § 135). Hieruit berekent men volgend tabelletje.

| ***Zonshoogte*.** | ***Afstand bij zon - kleine kring*.** |
|---|---|
| $0^{\circ}$ | $0^{\circ}$ |
| $10^{\circ}$ | $0^{\circ}20'$ |
| $20^{\circ}$ | $1^{\circ}14'$ |
| $30^{\circ}$ | $2^{\circ}59'$ |
| $40^{\circ}$ | $5^{\circ}48'$ |
| $50^{\circ}$ | $10^{\circ}36'$ |

Dit klopt zeer goed met de waarnemingen. Bij zonshoogten boven $40^{\circ}$ hebben we helaas bijna geen metingen, omdat het verschijnsel dan meestal onduidelijk wordt; tracht deze leemte aan te vullen!

## 137. De horizontale raakbogen van de kleine kring. (fig. 123*c*).

Deze bogen, die men onder en boven aan de kleine kring kan zien als een vermeerdering van de helderheid, ontpoppen zich bij

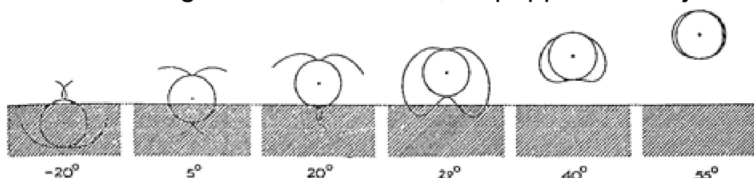



Fig. 126. Verschillende vormen van de omschreven halo, bij toenemende zonshoogte (naar de berekeningen van Pernter).

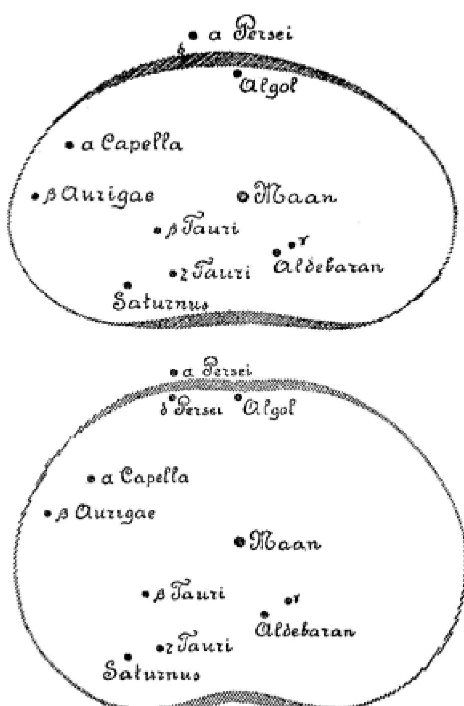



Fig. 126*b*. De omschreven halo, vastgelegd ten opzichte van de sterren die in de nabijheid van de maan voorkomen.[1)]

gunstige gelegenheid als onderdelen van een veel grotere lichtkromme: *de omschreven halo*. Dit zeer eigenaardige haloverschijnsel ontstaat, als de zeskante prisma's bij voorkeur hun as horizontaal richten, en een weinig om die stand heen en weer schommelen; zo iets zal bv. voorkomen als de kristalletjes niet de vorm hebben van plaatjes, maar die van staafjes.

Deze omschreven halo is sterk in vorm afhankelijk van de zonshoogte (fig. 126). Bij geringe zonshoogte (20$^{o}$) ziet men alleen dat de bovenraakboog aan beide zijden naar beneden terugbuigt; bij grotere zonshoogten ziet men een bijna elliptische

1) Naar Veenhuizen, Onweders enz. **35**, 119, 1914. Cliché in bruikleen van het Kon. Ned. Meteorologisch Instituut.

figuur. De gedeelten van de krommen onder de gezichteinder zijn door berekening gevonden, en ook wel eens van op een berg waargenomen, zodat de blik naar beneden gericht kon worden (misschien ware dit ook van op een toren mogelijk, of van uit een vliegtuig).

## 138. De zijdelingse raakbogen aan de kleine kring = 'de schuine bogen van Lowitz'.[1)] (Fig. 123*d*).

Het zijn merkwaardige boogjes, die van de bijzon schuin naar beneden uitgaan en aan de kleine kring raken. Een zeldzaam verschijnsel! Er is alleen kans het te zien, als de zon hoog is, en de bijzonnen dus vrij ver buiten de kleine kring staan. De boogjes ontstaan, wanneer de vertikale ijsprisma'tjes die de bijzon vormen een weinig om de vertikaal schommelen. Dikwijls ziet men alleen dat de bijzon ietwat schuin uitgerekt lijkt, bv. over $1^{o}$ of $2^{o}$; de helling van het boogje met de horizon is ongeveer $60^{o}$. Slechts in één geval was de boog vrij scherp en lang.[2)] - Het is dus zaak de bijzonnen altijd nauwkeurig op dit verschijnsel te onderzoeken, vooral bij hoge zon.

## 139. De boog van Parry. (Fig. 123*e*).

Zeer zeldzaam! Een weinig gekromd boogje, even boven de kleine kring. Ontstaat wanneer de zeskante ijsprisma's niet alleen de neiging vertonen met hun as horizontaal te zweven, maar ook een voorkeur vertonen voor het horizontaal richten van een der zijvlakken.

## 140. De grote kring van $46^{o}$ (fig. 123*f*).

Hij verschijnt ruim tweemaal zo ver van de zon als de kleine kring, en is evenzo gekleurd; maar hij is lichtzwakker en veel

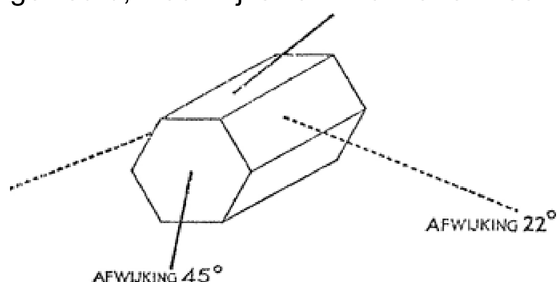



Fig. 127. In een 6-kant ijsprisma kunnen de lichtstralen een kleinste afwijking van $22^{o}$ en van $46^{o}$ vertonen.

minder dikwijls waar te nemen. Nauwkeurige metingen van de straal van de binnenrand zijn wenselijk.

1) E. van Everdingen, Hemel en Dampkring, **16**, 97, 1918. - Onweders, enz. **39**, 66, 1918 en **43**, 44, 1922. - Visser, Diss. Utreeht, 1936.
2) Hemel en Dampkring, **20**, 39, 1922.

Deze halo ontstaat evenals de kleine kring, maar door breking in ijsprisma's van 90° die volgens het toeval gericht zijn. Zoals men uit fig. 127 ziet, kan hetzelfde type van ijskristalletjes tegelijk de kleine en de grote kring doen ontstaan.

### 141. De bijzonnen van de grote kring. (fig. 123*g*).

Ze zijn zelden waargenomen; en dat is begrijpelijk: brekende kanten van 90° zouden daarvoor in groten getale vertikaal gericht moeten zijn. Men ziet nauwelijks in hoe dit bij de gewone ijskristalvormen ooit kan voorkomen.

### 142. De raakbogen aan de grote kring schuin onder. (fig. 123*h*).

Vrij zelden! Zij ontstaan door een voorkeursstand met horizontale as en horizontaal zijvlak terwijl de lichtstralen in de hoek van 90° breken. Bij *zeer* hoge zon kan men die boog recht zien worden, en tenslotte zelfs hol naar de zon toe.

### 143. De bovenraakboog aan de grote kring. (fig. 123*i*).

Deze moet ontstaan als prisma's van 90° met hun ribbe horizontaal zweven en om die stand schommelen; die welke in de stand der kleinste afwijking zijn geven dan de raakboog. Een dergelijke bovenraakboog wordt dikwijls waargenomen; het schijnt echter meestal niet de echte bovenraakboog te zijn, maar de circumzenithale boog van Bravais.

### 144. De circumzenithale boog. (fig. 123*i*).

Een der mooiste haloverschijnselen! Vrij dikwijls waar te nemen: een bonte regenboogkleurige boog, evenwijdig aan de gezichteinder, ongeveer waar men de bovenraakboog van de grote kring zou verwachten, maar meestal *een paar graden hoger*.

Men denke zich plaatjes of parapluvormen (fig. 125), stabiel zwevend met hun as vertikaal; dan breekt een zonnestraal in het prisma van 90°, maar dit heeft in 't algemeen *niet* de stand van kleinste afwijking. Uit fig. 128 ziet men dat

$$\sin i' = n \sin r' = n \cos r = n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 i}{n^2}} = \sqrt{n^2 - \sin^2 i}.$$

Hieruit volgt dan onmiddellijk de afwijkingshoek: $i' + i - 90°$. Bij een zonshoogte H = 10° wordt dit ongeveer 50°; bij

H = 20° wordt het 46° (het minimum); bij H = 30° weer $49_5$°. De raakboog aan de grote kring, met een afwijkingshoek van 46°, is dus alleen bij hoge en bij lage zon van de circumzenithale boog te onderscheiden.

Het is zeer de moeite waard de circumzenithale boog bij hoge zon waar te nemen en te meten. Theoretisch is nooit meer dan de helft van de cirkel te zien, praktisch niet meer dan ⅓; toch

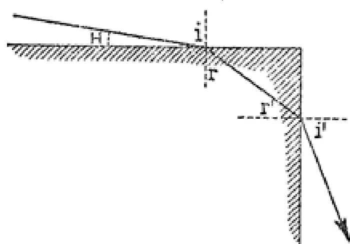



Fig. 128. Breking van een lichtstraal door een ijsprisma van 90°.

beweert men een enkele maal de volledige cirkel te hebben waargenomen.[1)]

Mochten de raakboog en de circumzenithale boog *beide* aanwezig zijn, dan moest men *een tussenruimte* van een paar graden tussen de twee zien. Inderdaad is het eens voorgekomen, dat men een brede boog zag, over zijn gehele lengte overlangs verdeeld door een donkere band, welke ineens verscheen en iets later verdween.[2)] Toch is een dergelijke waarneming zeer zelden mogelijk, want daarvoor moet tegelijk een groep horizontaalzwevende plaatjes en een groep onregelmatig gerichte plaatjes aanwezig zijn.

## 145. De horizontale cirkel. (fig. 123*k*).

Dit is een kring die op de hoogte van de zon evenwijdig aan de gezichteinder loopt; soms is hij over de volle 360° te volgen, dikwijls echter ziet men hem moeilijk in de nabijheid van de zon, waar de hemel al vrij helder is. Aangezien hij *ongekleurd* is, moet hij klaarblijkelijk door terugkaatsing en niet door breking ontstaan; in dit geval zijn de terugkaatsende vlakjes de zijvlakken van ijsprisma's, welke met hun assen vertikaal zweven.

Een dergelijke lichtband kan men zien als men naar een lichtbron kijkt door een ruit, welke met een ietwat vettige doek in één bepaalde richting gepoetst is; of bij terugkaatsing door fijn geribbeld glas. De lichtband staat altijd loodrecht op de ribbeltjes.

1) Hemel en Dampkring, **20**, 39, 1922. - Waarneming van Lambert in 1838, naar Pernter - Exner, blz. 300.

2) M.W.R. 506, 1920.

## 146. Lichtzuilen.[1)]

Vrij dikwijls ziet men boven de op- of ondergaande zon een vertikale 'lichtzuil' of liever lichtpluim, het mooist waar te nemen als de zon achter een huis verborgen zit, zodat het oog niet verblind wordt. De lichtzuil is eigenlijk ongekleurd, maar als de zon laag staat en geel, oranje, of rood is geworden, heeft de zuil natuurlijk dezelfde tint. Meestal is zij maar een graad of vijf hoog, zelden $15^{o}$ en meer; *onder* de zon komen lichtzuilen weinig voor en zijn ze korter. Bij hoge zon verschijnen ze zelden, daarentegen ziet men ze dikwijls heel goed als de zon al achter de gezichteinder gezonken is.

Denk u een wolk van ijsschilfertjes die alle heel langzaam vallen, en goed horizontaal gericht blijven: de invallende zonnestralen worden erdoor teruggekaatst,




Fig. 129. De eenvoudigste verklaring voor het ontstaan van lichtzuilen onder en boven de zon.

maar bereiken ons oog niet. Denk u echter (fig. 129) dat die ijsschilfertjes *een weinig om de horizontaal gaan hellen* over een hoek Δ, maar naar allerlei windstreken: de teruggekaatste lichtstralen krijgen nu allerlei kleine afwijkingen; en als de helling Δ kleiner blijft dan *h*/2 (*h*=zonshoogte), zien we een zuil onder de zon, - enigszins op dezelfde wijze als zich lichtzuilen vormen in gerimpelde wateroppervlakken (§ 14); wordt de helling der ijsplaatjes groter dan *h*, dan zien we niet alleen een zuil onder de zon, maar ook een zwakkere zuil erboven.

Deze voorstelling is echter in twee opzichten in strijd met de waarnemingen. Vooreerst zouden de zuilen altijd sterker moeten zijn onder dan boven de zon; en verder zouden zuilen boven een vrij hoog staande zon nooit kunnen voorkomen, daar ijsplaatjes die om de horizontale stand schommelen slechts betrekkelijk kleine afwijkingen vertonen (vgl. § 48). - Noch het ene, noch het andere is waar.

Men heeft gedacht dat *herhaalde terugkaatsingen* een rol spelen, maar het lichtverschijnsel zou dan veel zwakker zijn, en men

1) E. van Everdingen, Onweders enz. **28**, 77, 1907. C. Schoute. Hemel en Dampkring, **7**, 1, 1909. - K. Stuchtey, Ann. d. Phys. **59**, 33, 1919. - Vgl. ook de bij § 14 opgegeven litteratuur.

kan laten zien dat de zuil veel breder zou worden dan ze zich gewoonlijk aan ons oog vertoont. Men heeft gedacht aan *de kromming der Aarde*, waardoor de waarnemer in éénzelfde gezichtsrichting plaatjes ziet van merkbaar verschillende helling. Men heeft tenslotte ook gedacht aan *ijsplaatjes die in snelle rotatie zijn* om een horizontale as en daardoor alle mogelijke standen in de ruimte innemen; en deze onderstelling schijnt wel een der waarschijnlijkste, ofschoon ze nooit volledig dóórgerekend is.

De lichtzuilen leken een zó eenvoudig verschijnsel. Wie had gedacht dat de verklaring al die moeilijkheden zou meebrengen?

### 147. Lichtkruisen (plaat VIII*b*).

Als tegelijk een vertikale zuil en een stukje van de horizontale cirkel optreden, zien we een 'kruis' aan de hemel. Wij behoeven niet te zeggen dat de bijgelovigheid hier haar gading gevonden heeft!

Op 14 Juli 1865 betraden de alpinist Whymper en zijn tochtgenoten als eersten de top van de Matterhorn; maar vier der koene mannen gleden bij de terugweg uit, en stortten in de afgrond. Tegen de avond zag Whymper aan de lucht een ontzaglijke lichtkring met drie kruisen: 'de spookachtige lichtverschijnselen hingen onbewegelijk; het was een wonderlijk en ontzettend schouwspel, enig in mijn ervaring, en onbeschrijfelijk indrukwekkend op zulk een ogenblik.'

### 148. De onderzon.

Zij is slechts van op een berg of uit een vliegtuig te zien. Het is een ietwat langwerpig, ongekleurd spiegelbeeld: de zon die zich spiegelt, niet in een wateroppervlak, maar in een wolk! En wel een wolk van ijsplaatjes, die blijkbaar uiterst rustig zweven, gezien de betrekkelijke scherpte van het beeld.

### 149. Dubbele zon.[1)]

Soms zien we een lichtvlek vlak boven de zon, - zeer zelden er onder -. De afstand van de zon tot haar wazig spiegelbeeld is meestal niet veel meer dan $1^{o}$ tot $2^{o}$. In zeldzame gevallen

1) Hemel en Dampkring, **5**, 12, 1907; **6**, 12 en 28, 1908. - E. van Everdingen, Onweders enz. **28**, 77, 1907. - C. Schoute, Hemel en Dampkring, 7, 1, 1909.

waren er 2 en zelfs 3 van die spiegelbeelden boven de zonneschijf.

Ook hier is de verklaring niet eenvoudig. Men moet wel aannemen dat er ijsplaatjes in de lucht zweefden, waarin een *dubbele* weerspiegeling gebeurde; als dan de richtingen der plaatjes niet geheel en al dezelfde waren bij de eerste en bij de tweede weerspiegeling, ontstaat een verschoven lichtvlek.

## 150. Zeer zeldzame en twijfelachtige haloverschijnselen.

Na de vele reeds besproken halovormen, moge nog volgende kleine lijst een denkbeeld geven van de wonderbaarlijk grote rijkdom aan veel zeldzamer verschijnselen, die soms op het meest onverwachte ogenblik met verrassende duidelijkheid verschijnen.

Kringen om de zon van $8^{o}$-$9^{o}$, $16^{o}$-$19^{o}$, $27^{o}$-$3^{o}$; scherm altijd de zon af om deze lichtzwakke kringen te zoeken! Het is merkwaardig dat ze dikwijls met verscheidene tegelijk optreden.[1)]

Kring om de zon van $90^{o}$ straal, wit. Zeer twijfelachtig.

De tegenzon, een lichtvlek die op de horizontale cirkel ligt tegenover de zon, meest kleurloos en nogal wazig.

De bijzonnen op de kring van $90^{o}$; op $33^{o}$ van de zon[2)]; op $19^{o}$ van de zon.[3)]

De witte bijtegenzonnen op $120^{o}$ van de zon; ook op $40^{o}$? $84^{o}$-$100^{o}$? $145^{o}$?[4)].

De bijzon onder de gezichteinder, als spiegelbeeld van de gewone bijzon te zien van uit een vliegtuig of op een berg; nog maar éénmaal waargenomen.[5)]

Bijzonnen van de bijzonnen (een sekundair haloverschijnsel).

Bijzonnen op de plaats waar de kleine kring en de vertikale zuil de gezichteinder bereiken.

Raakboog aan de kleine kring op de plaats van de bijzon.[6)]

De scheve bogen door de tegenzon, meest wit, eenmaal gekleurd gezien.[7)]

Bogen aan de tegenovergestelde zijde van de zon, nl. kringen om de tegenzon, met een straal van $33^{o}$, $35^{o}$, $38^{o}$.

Ongewone circumzenithaalboog op verschillende hoogten.

1) E. van Everdingen, Hemel en Dampkring, **31**, 1933.
2) C.W. Hissink, Hemel en Dampkring, **4**, 64, 1906.
3) Hemel en Dampkring, **30**, 207, 1932. - Gerl. Beiträge z. Geoph. 1934.
4) S.W. Visser, Hemel en Dampkring, **34**, 114, 1936.
5) H. Berg, Met. Zs. **52**, 227, 1935.
6) Hemel en Dampkring, **24**, 390, 1926.
7) E. van Everdingen, Hemel en Dampkring, **34**, 177, 1936. - S.W. Visser, Hemel en Dampkring, **34**, 309, 1936.

Ellips om de zon met lange as van 10° vertikaal, korte as van 8° horizontaal.

De kring van Bouguer, om het tegenpunt der zon, met een straal van 35°-38°; hij is dikwijls moeilijk te onderscheiden van een mistboog, maar de kring van Bouguer is geheel ongekleurd, heeft geen overtallige bogen, en is meestal vergezeld van andere haloverschijnselen.

## 151. Scheve en vervormde haloverschijnselen.

Men heeft soms lichtzuilen gezien, die niet vertikaal maar schuin stonden, tot zelfs 20° ten opzichte van de vertikaal hellend![1] De scheve lichtzuilen op golvend water hebben we verklaard door een voorkeursrichting in de golfjes; hier ligt het voor de hand, aan te nemen dat de ijskristalletjes niet horizontaal zweven, maar door bepaalde luchtstromingen schuin worden gericht - hoe dat nu precies gebeurt, is niet heel gemakkelijk te verklaren!

Evenzo kent men bovenraakbogen die de kleine kring 10°-12° naast de top raakten.[2] De horizontale cirkel is soms scheef gezien; eenmaal, toen de zon 50° hoog was, bleek dat hij aan beide zijden naar de gezichteinder toe kromde: op 90° van de zon was hij slechts 25° boven de kim.[3] Een ander maal liep deze cirkel 1°-2° onder de zon! De bijzon van de kleine kring stond eens 40' te hoog, wat bijzonder duidelijk was omdat de zon op het punt was onder te gaan.[4]

Meer waarnemingen zijn nodig! En vooral neme men alle voorzorgen om subjektieve beoordelingsfouten te vermijden: schietlood gebruiken; fotograferen terwijl een schietlood op enige afstand vóór het toestel gehouden wordt, en zich (ietwat onscherp) op de plaat aftekent.

## 152. De ontwikkelingsgraad van haloverschijnselen.[5]

De niet-geschoolde waarnemer overdrijft altijd de regelmaat der natuurverschijnselen; hij tekent de sneeuwkristallen volmaakt symmetrisch, vindt in de regenboog 7 kleuren, en ziet de bliksem

1) M. Pinkhof, Met. Zs. **33**, 545, 1916.
2) Hemel en Dampkring, **30**, 19, 1932.
3) Hemel en Dampkring, **16**, 33, 1918. - Vgl. ook noot 2.
4) C.W. Hissink, Hemel en Dampkring, **9**, 13, 1911.
5) Chr. A. Nell, Hemel en Dampkring, **7**, 41, 1909.

als een zigzaglijn! Zo is er ook de neiging, de haloverschijnselen vollediger te beschrijven dan ze in werkelijkheid zijn. - En toch komt het volstrekt niet op hetzelfde neer, of de kleine kring over de helft van zijn omtrek zichtbaar is dan wel helemaal. ‘De onvolkomenheid’ der natuurverschijnselen wordt ook door vaste wetten beheerst en is in haar soort weer een regelmaat.

Daarom is het belangwekkend, voor elk haloverschijnsel op te tekenen in welke mate het ontwikkeld is, door een schatting te maken zowel van de lichtsterkte als van de uitgestrektheid van het zichtbare gedeelte. Door het maken van gemiddelden kan men de invloed van toevallige ongelijkmatige verdeling der wolken grotendeels wegwerken. In het algemeen vindt men, dat de gedeelten die het meest lichtsterk zijn ook het veelvuldigst tot ontwikkeling komen. Een halo die bijzonder lichtsterk is, is gemiddeld ook bijzonder uitgebreid. Een matig dunne wolkenlaag is het gunstigst voor de ontwikkeling der halo's: de zeer dunne lagen bevatten te weinig kristallen, de zeer dikke laten geen licht genoeg door of verstrooien het diffuus in allerlei richtingen.

Zeer belangwekkend is, dat de bovenkant van de kleine kring gemiddeld ongeveer 3 maal veelvuldiger zichtbaar is dan de onderkant. Men heeft als reden opgegeven dat de weg der stralen door de wolkenlaag zoveel groter is aan de onderzijde; maar dit kan evengoed een voordeel als een nadeel zijn.

## 153. Haloverschijnselen vlak bij ons oog.[1)]

Iemand die door een nauw straatje liep, zag een kring om de maan, maar bemerkte dat een deel daarvan zich projekteerde *op de donkere muur*, één geheel vormend met de halo aan de hemel. Ook al werd de maan met de hand bedekt, toch bleef de halo zichtbaar: 't was dus *geen* verschijnsel in het oog, de ijskristalletjes zweefden blijkbaar tussen het oog en de muur, reeds op enkele meters boven de grond.[2)]

Bij zeer koud weer (-10$^{o}$) vertoonde de stoom van een trein in 't station te Utrecht fraaie haloverschijnselen.[3)] Nabij een der stationslampen, waar de stoomwolk sterk dwarrelde in allerlei richtingen, zag men een spoelvormig oppervlak verlicht, waarvan het ene uiteinde zich bij het oog bevond, het andere bij de lamp; (fig. 130); alle kristalletjes die op dit oppervlak kwamen zag men

1) Met Zs. **27**, 113, 1910.
2) Medegedeeld door Prof. J.A. Vollgraff te Leiden.
3) M. Minnaert, Hemel en Dampkring, **26**, 51, 1928.

oplichten, daarbinnen was alles donker; de raakkegel aan de spoel had een tophoek van ongeveer 44°. Men begrijpt onmiddellijk dat het spoelvormige oppervlak eenvoudig de meetkundige plaats is van alle punten P, zò dat OP en PL samen een hoek van 22° vormen.

Het merkwaardige van deze waarneming is het *driedimensionale* haloverschijnsel; dit is alleen mogelijk doordat de lichtbron

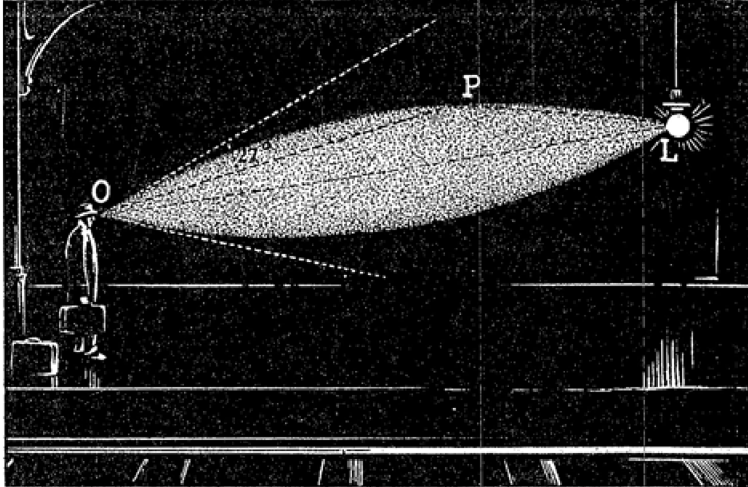



Fig. 130. Een kleine kring, waargenomen in de onmiddellijke nabijheid van ons oog.

zo dichtbij is, en de ogen, samenwerkend, de individuele lichtpuntjes zien en stereoskopisch hun afstand schatten.

Bij diezelfde gelegenheid werd opgemerkt dat lampen in een rustiger gedeelte van het station fraaie lichtkruisen vertoonden. Het verschijnsel is bekend: 's winters in Rusland ziet men dikwijls lichtzuilen boven de lantarens in de verte, een bewijs dat er een nevel van ijskristalletjes in de lucht zweeft.

In opgewervelde sneeuw heeft men wel eens de kleine kring, de bijzonnen, de bovenraakboog, en de grote kring gezien.

## 154. Haloverschijnselen op de grond.

Evenals we de regenboog geprojecteerd op een horizontaal vlak als dauwboog zagen, zo kan men soms op vers gevallen sneeuw, de kleine en de grote kring als hyperboolvormige bogen waarnemen (fig. 131), naar het schijnt vooral bij uitzonderlijk lage temperaturen (-12°

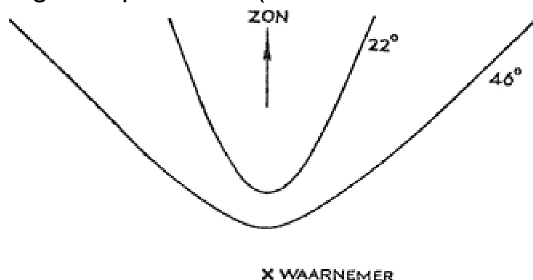



Fig. 131. De kleine en de grote kring, zich op de grond als hyperbolen aftekenend in verse sneeuw.

of lager), minder zelden echter bij rijp.[1] De zon moet laag staan, men kijke ½ of 1 u. na zonsopgang of vóór zonsondergang. De lichtstreep bestaat uit een aantal afzonderlijkekristalletjes, die in de prachtigste kleuren fonkelen; aan de naar ons toe gekeerde zijde zijn vooral rood en goudbruin goed vertegenwoordigd; maar de tinten zijn klaarblijkelijk niet zeer verzadigd. Beweegt men zich, dan verplaatst het lichtverschijnsel zich ook.

Men kan de hoek oog-kristal-zon door eenvoudige metingen bepalen, en aantonen dat de lichtstralen over 22° gebroken worden (resp. 46°). Onderzoek de vormen der kristalletjes onder de loupe, teken en meet ze!

### *Kransen.*

## 155. Interferentiekleuren in olievlekken.

Als de grond nat is na de regen, zien we op onze mooie, donkere geasfalteerde wegen overal prachtig gekleurde vlekken die uit concentrische ringen bestaan; soms kunnen ze wel 50 cm groot worden. Werkelijk mooi zijn ze slechts op bepaalde wegen en op bepaalde dagen, terwijl ze zich anders als blauwgrijze vlekken met weinig kleuren vertonen. Klaarblijkelijk zijn ze gevormd door druppels olie, van de voorbijrijdende auto's weggespat;

1) Listing, Ann. d. Phys. **122**, 161, 1864. - Meyer, das Wetter, **42**, 137, 1925.

zulk een druppeltje breidt zich uit tot een heel dun laagje, en er ontstaan *interferentiekleuren* door de samenwerking van het licht dat aan de boven- en aan de onderkant van het laagje teruggekaatst is: de beroemde 'kleuren van Newton', dezelfde die we ook in de fantastisch mooie tinten der zeepbellen terugvinden. Voor hun verklaring verwijs ik naar de gewone leerboeken der natuurkunde, en wil slechts opmerken, dat wij hier feitelijk voor onze ogen bewezen zien dat het licht een golfverschijnsel is.

In volgend tabelletje zijn de kleuren opgesomd, aan de buitenkant van de vlek beginnend en geleidelijk tot het midden naderend; daarnaast staat de dikte van het oliehuidje in *μ* (= duizendste millimeter).

| | | |
|---|---|---|
| I. | zwart | 0 |
| | heldergrijs | 0,080 *μ* |
| | bruingeel | 0,115 |
| | rood | 0,170 |
| II. | violet | 0,190 |
| | blauw | 0,210 |
| | groen | 0,270 |
| | geel | 0,305 |
| | rood | 0,340 |
| III. | violet | 0,385 |
| | blauw | 0,400 |
| | groen | 0,455 |
| | geel | 0,505 |
| | vleeskleurig | 0,525 |
| IV. | grauwblauw | 0,595 |
| | groen | 0,655 |
| | vleeskleurig | 0,695 |
| V. | blauwgroen | 0,820 |

De olielaagjes zijn dus het dunst aan de buitenzijde en worden naar het centrum toe steeds dikker. Soms bereiken ze zelfs in het midden nog maar een der eerste trappen van de kleurenschaal; andere malen zijn ze zo dik, dat na de kleuren van ons tabelletje nog verscheiden malen rose en groen elkaar afwisselen, steeds bleker wordend en in 'wit van hogere orde' overgaand, zodat er in het midden geen ringen meer te zien zijn.

Meet de middellijn van een regelmatig gevormde vlek op

de plaats der verschillende kleuren, en teken de doorsnee van het olielaagje op schaal! Herhaal dit na 10 minuten, en zie hoe de olieberg zich heeft vervlakt! Volg één bepaalde kleur als functie van de tijd: de ring zet eerst uit, daarna trekt hij samen; waarom? Tenslotte ziet men alleen nog een grijze vlek, waarvan men de oorsprong niet zou hebben vermoed als men hem niet in vorming had gezien. De beste manier is, bij één vlek te blijven staan en alle veranderingen te meten. Zo héél veel geduld is er niet voor

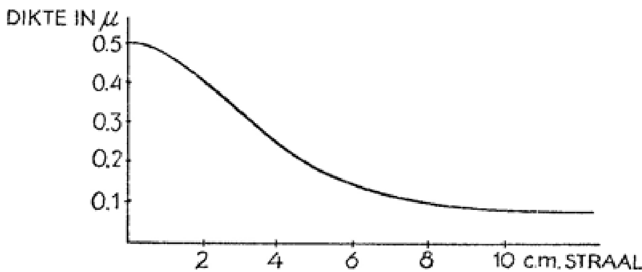



Fig. 132. Doorsnede op schaal van een oliedruppel op nat asfalt, met behulp der interferentiekleuren gemeten.

nodig: misschien maar een half uur. Bescherm hem tegen fietsen en voetgangers; en moge hij het eind van zijn leven bereiken vóór er een auto overheen gereden is!

Bekijk de olievlek onder een schuine hoek: de kleuren verlopen, het is alsof de laag dunner geworden was. Want bij schuiner kijken schijnen de gekleurde ringen zich samen te trekken, in elk punt wordt de kleur dus vervangen door de kleur die eerst bij een dunnere ring behoorde. Geef u daar rekenschap van door het faseverschil der twee interfererende stralen te berekenen. - Mijn tweejarig zoontje strijkt er met de vinger over: de kleuren verlopen eerst, maar komen verrassend snel terug; de ringen zijn iets kleiner geworden, want er is een weinig olie weggenomen.

Soms ziet men mooi gevormde dubbelvlekken die klaarblijkelijk samenhoren. Hieraan is niets geheimzinnigs: ze zijn ontstaan uit een normale vlek, waar een automobiel over heen gereden is!

Helemaal tevreden zijn we niet, vóór we de gekleurde ringen zelf hebben kunnen namaken. Een druppel petroleum of een druppel terpentijn, op een vijvertje uitgegoten, geven onbeschrijfelijk mooie kleuren. Maar als we 't met *olie* beproeven wacht ons een verrassing: de olie breidt zich niet tot een huidje uit en

we zien niets; het lukt evenmin op een natte weg als op een wateroppervlak. Bestaan de vlekken dan wellicht uit *benzine*? Ook hier worden we teleurgesteld, we krijgen slechts witgrijze vlekken, blijkbaar uiterst dun, en in niets gelijkend op de prachtige kleurenringen. Een nader onderzoek heeft bewezen, dat alleen *de afgewerkte, geoxydeerde olie*, die uit de motor lekt, het vermogen heeft om zich over water uit te breiden.[1)] Hoe sterker de olie geoxydeerd is, des te dunner wordt het laagje.

De meeste olievlekken vertonen een straalsgewijze streping; elke gekleurde ring gaat als 't ware met franjes in de volgende over, en ook de buitenste, witgrijze ring eindigt in franjes. Bij het uitgieten van benzine over een natte weg zien we hoe de gevormde vlek zich aan alle kanten door uitgroeiende takjes uitbreidt, en ontstaat er vóór onze ogen een radiale streping en uitrafeling. Het verschijnsel is ook herhaaldelijk te zien aan de gekleurde huidjes die hier en daar op verontreinigd water drijven. Misschien spelen zeer bijzondere molekulaire krachten hier een rol.

Interferentiekleuren ziet men overal waar zich een dun laagje gevormd heeft. Bijvoorbeeld aan de huidjes asfalt en petroleum die op 't water drijven; lijnen van constante kleur zijn tevens lijnen van constante dikte, waarvan de vervormingen ons alle stromingen en wervelingen van de vloeistof verraden. - Op de koperen bekleding van sommige lokomotiefschoorstenen zijn mooie aanloopkleuren te zien. Is het koper heet geworden en geoxydeerd? Of is het door de lange inwerking der buitenlucht en der verbrandingsgassen met een laagje sulfide bedekt?

### 156. Prachtige kleuren op een bevroren ruit.

Ziehier een geheimzinnig verschijnsel. Ik heb het éénmaal waargenomen toen ik op een abnormaal koude winteravond ($-10^{o}$) in de trein zat. Op de ruiten begon de waterdamp te bevriezen die de reizigers in de treincoupé hadden uitgeademd; ineens bleek het dat het licht van elke lantaren een wonderbaar kleurenspel deed ontstaan: bepaalde delen van het dunne ijslaagje vertoonden een hemelsblauwe tint, andere een groene of rode; deze kleuren bleven ongeveer gelijk over een oppervlakje van de orde van 1 $cm^2$; ze waren alleen te zien in doorvallend, en niet in teruggekaatst licht. De tinten waren zo mooi en verzadigd, dat men onmiddellijk voelde: hier zie ik iets heel bijzonders!

1) K.B. Blodgett, J.O.S.A. **24**, 313, 1934.

Het verschijnsel duurde maar enige minuten; daarna was de ijslaag enkele 0,1 mm dik geworden en zag men niets meer.

Nu blijkt dat een dergelijke waarneming al eens beschreven is[1)], en wel veel nauwkeuriger dan het mij in die enkele minuten mogelijk was. Als men ademt op een zeer koude ruit, schijnt de adem eerst te bevriezen tot kleine halfronde ijsklompjes (*a*), na een halve minuut ongeveer vormen zich barstjes in de laag en gaan de ijsdeeltjes zich in groepjes verzamelen (*b*), tot ze tenslotte lange naalden vormen, waartussen men het heldere ijs ziet (*c*). Het is alleen in het stadium (*b*) dat de kleuren optreden; vandaar dat ze zo kort duren. Verder is het zeer typische, dat de lantaren of de lichtbron die men bekijkt zelf gekleurd wordt, en omgeven is door een krans van de complementaire kleur; in de dag ziet men bv. de heldere sneeuwpartijen van het landschap rozerood, donkere partijen groen.

De oorzaak van dit merkwaardige verschijnsel is nog niet bekend. Men krijgt de indruk dat het alleen bij grote koude optreedt. Onwillekeurig gaat men denken aan kleuren van dunne laagjes, of aan de 'kleuren van Christiansen'. Maar alleen meer waarnemingen en proeven kunnen hier licht brengen.

Heeft het verschijnsel iets te maken met de iriserende wolken (§ 166)?

## 157. Interferentiekleuren in ijzerhoudend water.

Waar de heidegrond ijzerhoudend is, wordt het bruine water der sloten soms bedekt met een dun, iriserend laagje, dat bleke kleuren vertoont als paarlemoer. Die kleuren ontstaan, doordat het ijzeroxyde, dat kolloidaal in het water opgelost is, zich in evenwijdige plaatjes groepeert, op afstanden van ongeveer ¼ $\mu$ van elkaar[2)]: zulk een lamellair opgebouwd huidje werkt min of meer als een kleurenfoto van Lippmann.

## 158. De buiging van het licht.

Nacht. Uit de donkere verten van de grote straatweg komt een automobiel aangesnord, een felle lichtbundel voor zich uit werpend. Maar toevallig komt een fietser net vóór het verblindende

1) Schlottmann, Met. Zs. **10**, 156, 1893. - Ook opgemerkt door Ch.F. Brooks, M.W.R. **53**, 49, 1925.
2) Zocher, Zs. f. allg. anorg. Chem. **149**, 203, 1925.

licht, zodat we een ogenblik in de schaduw staan. En o, ineens is het silhouet van den fietser met een wondermooie lichtlijn omzoomd, alsof die rand zelf licht ging uitstralen. Ook aan wandelaars, aan bomen is hetzelfde waar te nemen. Dit is nu de ‘buiging’ van het licht: aan de rand van een ondoorzichtig scherm gaat het een weinig om de hoek, en een deel van de golfbeweging bereikt het gebied waar men volgens de gewone ‘geometrische optica’ schaduw zou verwachten. Dit afgebogen licht is vrij sterk voor een zeer kleine afwijkingshoek, maar neemt snel af voor grotere hoeken; vandaar dat het verschijnsel zo mooi is als de fiets ver van ons verwijderd is, en de auto nog veel verder.

Een dergelijk verschijnsel op grote schaal wordt vooral in de berglanden met zuivere lucht waargenomen als men, zelf in de schaduw staande van een heuvel, de begroeide bovenrand zwart ziet afsteken tegen de ochtendhemel: op de plaats waar het licht het felst is en de zon straks zal opgaan, ziet men de bomen schitterend zilverwit omstraald.[1)]

Het schijnt dat in onze streken vooral de gaspeldoornstruiken, tegen de zon gezien, een dergelijk soort effekt kunnen teweegbrengen.

## 159. Buiging van het licht aan kleine krassen.

Kijk door de ruit van een treincoupé naar de zon, dan ziet u daar omheen duizenden uiterst fijne krasjes in het glas, alle concentrisch om de zon gerangschikt. Door welk deel van de ruit we ook kijken, altijd is de figuur dezelfde. Blijkbaar zijn er dus *overal* op het glas krasjes in *alle* richtingen, maar men ziet alleen die welke loodrecht op het invalsvlak der lichtstralen staan (vgl § 27). Want elke kras spreidt het licht uit in een vlak loodrecht op zijn eigen richting, en wordt dus alleen voor een waarnemer in dit vlak zichtbaar.

Bij zulke heel fijne krasjes kan men niet goed meer spreken van terugkaatsing of breking, beter is het om dan de afwijking der lichtstralen als *buiging* te beschouwen. Als u aandachtig naar een van die krasjes kijkt, zult u zien dat het in bepaalde richtingen

1) Dit verschijnsel, oppervlakkig waargenomen door Folie, is indertijd druk besproken. Reeds in Rep. Brit. Ass. **42**, 45, 1872; later in Nat. **47**, 364. - Zs. f. Met. **12**, 410, 1877. - Met. Zs. **12**, 1877. - La Nature, **21**, 58, 1893.

de prachtigste kleuren in allerlei volgorden vertoont; met een nicol zoudt u kunnen merken dat er bij schuine inval- en waarnemingsrichting sterke polarisatie optreedt. - Al deze verschijnselen zijn zeer ingewikkeld, en slechts gedeeltelijk door de theoretische optica verklaard.[1)]

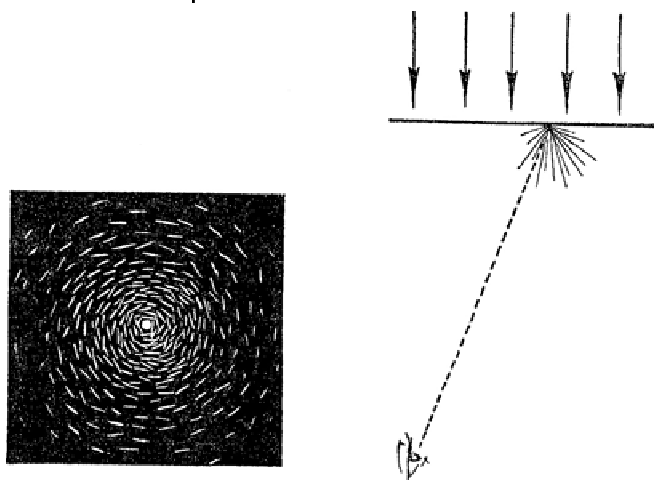


Fig. 133. Buiging van het licht door kleine krasjes op de ruiten.

## 160. Kransen.

*Een grote, stille vertedering*
*Daalt uit de hemel, de wolken kleuren*
*In iristinten om de maan ....*

*P. Verlaine* (*La bonne Chanson*).

Langzaam trekken de ijle witte schaapjeswolken voorbij de maan. Dit verlichte deel van de hemel is het middenpunt van het gehele nachtlandschap, waar ons oog zich onbewust toe aangetrokken voelt. En telkens als er weer een wolkje aankomt, zien we mooie, bontgekleurde lichtcirkels om het zachtstralend hemellichaam, met een middellijn van slechts enkele malen die van de maan zelf. In Vlaanderen zegt ons volk: 'de maan zit in een hof'.

Laten wij nauwkeurig de volgorde der kleuren nagaan! Vlak bij de maan is een blauwachtige rand, die overgaat in een geelachtig wit, en dit heeft zelf weer aan de buitenzijde een bruinachtige zoom. Deze *aureool* is het kransverschijnsel in zijn een-

1) Fizeau, Ann. Chim. Phys. **63**, 385, 1861. - Rayleigh, Phil. Mag. **14**, 350, 1907; Papers V, 410.

voudigste vorm, de vorm die verreweg het meest voorkomt. Iets bijzonders wordt het pas als daaromheen nog grotere, fraaier gekleurde ringen voorkomen. De volgorde daarvan is uit volgend tabelletje te zien, dat eigenlijk vrijwel geheel met de schaal van Newton's interferentiekleuren overeenstemt. Alleen hebben de meteorologen de grenzen tussen de 'orden' ietwat anders dan de physici gekozen, nl. zò dat elke groep met rood sluit. Buiten de aureool heeft men een heel enkele keer nog 3 groepen gezien ('4-voudige krans').

| | | |
|---|---|---|
| I. | aureool | (blauwachtig)<br>wit<br>(geelachtig)<br>bruinrood |
| II. | | blauw<br>groen<br>(geel)<br>rood |
| III. | | blauw<br>groen<br>rood |
| IV | | blauw<br>groen<br>rood |

Het schijnt wel zeker, dat de kleurschakeringen niet altijd geheel dezelfde zijn; die welke we tussen haken hebben gezet, zijn soms wel, soms niet aanwezig. Bij het onderzoek naar deze veranderlijkheid der kransen houde men rekening met de schijngestalten der maan, waardoor de buigingsfiguur soms waziger, soms scherper wordt.

Voor het schatten van de straal der kransen, is het best om op de rode zoom in te stellen waarmee elke orde eindigt, want die kleur tekent zich het scherpst af; men vergelijkt dan de grootte van de krans met de maansmiddellijn (32'). De grootte der kransen blijkt zeer veranderlijk te zijn: zo kan de bruine zoom van de aureool een straal hebben van ternauwernood 1°, terwijl hij andere malen tot 5° toe bereikt; als uiterste waarden vindt men opgegeven: 10' en 13°.

*Kransen om de zon* zijn zeer dikwijls te zien, tenminste zoveel als om de maan, maar men let er niet op omdat iedereen vermijdt

in het felle licht te kijken. En toch zijn door de grote helderheid van de zon de kransen om dit hemellichaam meestal de allermooiste.

Men vergemakkelijkt zich de waarneming door een van de volgende hulpmiddelen.

*a.* Bekijk de weerspiegeling van de Zon in rustig water; Newton's beroemde waarneming van een krans om de Zon is aldus gebeurd.
*b.* Gebruik als spiegel een stukje gepolijst zwart marmerglas, waarvan naamplaten vervaardigd worden; of het lasglas van de techniek; of een gewoon glaasje, dat aan de achterkant zwart gevernist is. Men houdt die plaatjes dicht bij het oog, om een groter veld te overzien.
*c.* Kies marmerglas of lasglas die voldoende doorzichtig zijn om de Zon zonder verblinding te kunnen waarnemen als u er doorheen kijkt.
*d.* Zorg dat de Zon door de rand van een dak bedekt wordt.
*e.* Kijk in een tuinbol van op een afstand van een paar meter, en bedek daarbij het beeld van de Zon met uw hoofd.

De aureool ziet men bijna bij elk wolkentype flauwtjes. In altocumuli of stratocumuli is de aureool veel sterker, en de volgende kleurengordel meestal reeds flauw aangeduid. De mooiste, verrukkelijk zuiver getinte kransen ontstaan in lichte cirrocumuli en naar het schijnt in cirri.

Soms kan men zelfs om *Venus, Jupiter en de helderste sterren* kleine, lichtzwakke kransen waarnemen.

## 161. De verklaring der kransverschijnselen.[1)]

De kransen die we in de wolken zien ontstaan vormen zich door buiging van het licht aan de waterdruppeltjes van de wolk. Ze zijn des te groter naarmate de druppeltjes kleiner zijn. In wolken waarin de druppeltjes allemaal dezelfde grootte hebben, zijn de kransen goed gevormd en de kleuren zuiver; waar er echter druppeltjes van allerlei grootte door elkaar voorkomen, ontstaan er tegelijkertijd kransen van verschillende grootte die elkaar overdekken. Vandaar dat mooi ontwikkelde kransverschijnselen slechts in zeer bepaalde soorten wolken voorkomen,

1) R. Meyer, Met. Zs. **27**, 112, 1910. - G.C. Simpson, Quart. Journ. **38**, 291, 1912. - Ch.F. Brooks, M.W.R. **53**, 49, 1925 (met litteratuur). - Köhler, Met. Zs. 40, 257, 1923.

waar de waterdamp onder voldoende gelijkmatige omstandigheden is neergeslagen; vandaar ook dat de fijnere onderscheidingen in de volgorde der tinten zullen afhangen van de aantallen druppeltjes van de verschillende grootten, van de dikte van de wolk, enz.

De theorie volgt in grote trekken deze gedachtengang:

*a.* de buiging aan een niet te dichte wolk van gelijke waterdruppeltjes is dezelfde als aan één druppeltje, maar het afgebogen licht heeft een grotere sterkte;

*b.* de buiging aan een druppeltje geschiedt op dezelfde wijze als aan een openingetje in een scherm (beginsel van Babinet);

*c.* de buiging door een openingetje berekent men door die opening te beschouwen als het uitgangspunt van trillingen (beginsel van Huygens), en na te gaan hoe de golven van alle delen der opening in het oog van den waarnemer samenkomen en interfereren.

De gelijkenis tussen de krans en het buigingsbeeld van een rond gaatje is gemakkelijk waar te nemen. Hang voor een raam waarop de zon schijnt een stuk karton, in het midden doorboord en weer dichtgeplakt met een stanniolblaadje[1)], waarin u een prik met een naald maakt; bekijk dit felle lichtpuntje in de richting naar de zon toe en van een afstand van een meter, en houd vóór het oog een tweede stukjes stanniol, ook voorzien van een fijn prikje. Deze gaatjes worden gemaakt met de scherpste naald, die tijdens het prikken voortdurend tussen de vingers gerold wordt: ze moeten niet meer dan 0,5 mm groot zijn. U ziet nu het gaatje verbreed tot een schijfje, dat een aureool in miniatuur is, en daaromheen een ringenstelsel dat met de achtereenvolgende orden van de krans overeenkomt. Hoe fijner het gaatje dat u voor uw oog houdt, hoe groter de buigingsfiguur.

De achtereenvolgende maxima en minima zijn geheel te vergelijken met de buigingsstrepen die een evenwijdige spleet geeft, alleen zijn hun afstanden ietwat anders. De uiterste rode zomen der aureool en der eerste orde liggen bij $\delta$ = 0,00070/$a$ en 0,00127/$a$ ($a$ = middellijn van het gaatje in mm; $\delta$ = hoekafstand van uit middenpunt).

Wij kunnen dus uit de kransen berekenen hoe groot de druppeltjes zijn waaruit de wolken bestaan! Is de straal $\delta$ van een aureool om de maan 4 maal de middellijn van dit hemellichaam,

1) Het ‘zilverpapier’ waarin toffee's en chocolade gewikkeld zijn.

dus 4/108 radiaal, dan bestaan de wolken uit druppeltjes, met een middellijn van

$$\frac{108}{4} \times 0,00070 = \frac{0,076}{4} = 0,019 \text{ mm}$$

middellijn. - Deze berekening is niet geheel juist, omdat de zon of de maan niet puntvormig zijn, maar een straal van 16' hebben. De uiterste zoom schijnt daardoor te groot; men trekt dus dikwijls 16' van de waargenomen hoek $\delta$ af, vóór men de formule toepast, maar het is zeer de vraag of deze werkwijze gerechtvaardigd is.[1) ] - Als resultaat zult u vinden, dat de druppeltjes in de wolken 0,01 mm tot 0,02 mm groot zijn.

Het is waarschijnlijk, dat kransen ook kunnen ontstaan door zwermen *ijsnaaldjes* van gelijke dikte, die het licht buigen op dezelfde wijze als een spleet. Kransen worden immers af en toe in de ijle, hoge cirruswolken waargenomen: het zijn zelfs de mooist gekleurde en best ontwikkelde; en deze wolken bestaan uit ijskristalletjes.

De berekening van de dikte der ijsnaaldjes geschiedt dan even eenvoudig als voor het geval van waterdruppeltjes: bij de krans die wij als voorbeeld namen, en waar de bruine zoom een straal van 4 maansmiddellijnen had, zou de dikte der ijsnaaldjes 0,062/4 = 0,015 mm zijn.

Bij het waarnemen van een krans is het heel moeilijk te zeggen, of hij door waterdruppeltjes of door ijsnaaldjes ontstaat. Voor ijsnaaldjes liggen de donkere minima op nauwkeurig gelijke afstanden van het centrum en van elkaar, terwijl voor druppeltjes de aureool een straal heeft die 20% groter is dan de daaropvolgende gordelbreedten. Ook neemt de lichtsterkte der opeenvolgende gordels veel langzamer af voor de ijsnaaldjes dan voor de druppeltjes. Maar dit zijn moeilijk waar te nemen onderscheidingen. De beste metingen spreken nu eens voor de éne, dan voor de andere ontstaanswijze, en wel overeenstemmend met wat men uit de aard der wolken zou verwachten.

De aanwezigheid van een mooie krans is voor den natuurkundige niet alleen een kenmerk van de grote gelijkmatigheid der wolkendruppeltjes of der ijsnaaldjes. Hij besluit er ook uit, dat de wolk waarschijnlijk vrij onlangs gevormd is: ‘een jonge wolk’. Want in zwermen druppeltjes is er een voortdurende

1) Onweders, enz. **54**, 54, 1933.

neiging tot het ongelijk worden; die welke toevallig wat kleiner zijn verdampen het snelst, terwijl die welke al iets groter waren

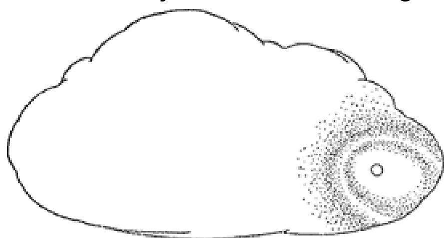


Fig. 134. Asymmetrische krans bij de grens van een wolkje.

ook het snelst verder groeien ten koste van de kleintjes.

Als een lucht van cirrocumuli of altocumuli ('schaapjeswolken') over de Maan trekt, ziet men soms heel mooi hoe de kransen *asymmetrisch* uitzetten naar de rand van het wolkje, telkens als er weer een over de Maan drijft (fig. 134). Blijkbaar zijn de druppeltjes kleiner in de buitenste delen van deze wolken dan in de binnenste. Het ligt inderdaad voor de hand, dat zij daar reeds beginnen te verdampen.

## 162. Kransen op de ruiten.

Als we op een winteravond langs de goed verlichte koffiehuizen wandelen, kunnen we dikwijls zien hoe de lampen omringd zijn door een kleurenkrans, veroorzaakt door de aangeslagen ruiten; op sommige delen van de ruit is de krans groter, op andere kleiner, dikwijls zien we alleen de aureool, soms echter zijn de gekleurde ringen verrassend mooi: het is alsof sommige ruiten het altijd mooier doen dan andere. Verklaring: de kransen ontstaan door buiging aan de hele kleine waterdruppeltjes op de ruit, ze zijn des te mooier naarmate de druppeltjes meer gelijk van grootte zijn. Het lijkt niet onmogelijk dat de druppeltjes op sommige soorten glas gelijkmatiger neerslaan dan op andere.

Deze kransen gelijken opvallend sterk op de wolkenkransen, en hun ontstaanswijze is eigenlijk dezelfde. In het ene geval bevinden zich de buigende druppeltjes op de ruit, in het andere geval zweven zij als bestanddelen van de wolk hoog in de lucht. Toch vertonen de kransen op de ruiten een verschil met die welke in de wolken waarnemen: *om de lichtbron is er een donker veld in plaats van een lichte aureool*. Dit schijnt te wijten te zijn aan de regelmatige schikking der druppeltjes, die zich netjes op gelijke afstanden van elkaar vormen, terwijl de drup-

peltjes in een wolk op onregelmatige wijze verdeeld zijn.[1)]

Kijken we schuin door de ruit, dan zien we de kransen eerst elliptisch worden, dan parabool- en zelfs hyperboolvormig. Als het nu was zoals bij de dauwboog, dan zouden we bedoelen: 'de kransen *zoals ze zich op de ruit aftekenen* zijn elliptisch, .... enz.; maar gezien *van uit mijn oog* liggen ze op zuivere kegelmantels om de as oog-lamp en projecteren zich als cirkels.' Ditmaal echter is het een ander geval: de kransen worden ook in projectie al elliptisch, ze zijn *nog extra uitgerekt* in horizontale richting: blijkbaar omdat ik elk druppeltje in die richting perspektivisch verkort zie, dus elliptisch. Dit bewijst meteen dat de buigende deeltjes geen bolletjes zijn maar halve bolletjes of segmenten van een bol. In de richting waarin ik de bolletjes het kleinst zie, worden de kransen het wijdst.

Aan beslagen ruiten ziet men ook de kransen *om het spiegelbeeld* der zon; dat is een verschijnsel dat strikt genomen aan de hemel niet te zien is, maar dat zich weinig van een echte krans onderscheidt.

Strooi een fijne laag lycopodiumsporen op een glazen plaatje; het is een fijn poeder dat elke apotheker gebruikt om er pillen mee te bestuiven. Kijk nu door die plaat naar een gloeilamp die tenminste 10 m van ons verwijderd is: wij zien de lamp omringd door prachtige kransen. Ander stof dan lycopodiumpoeder vertoont het verschijnsel niet; verklaring: de lycopodiumsporen zijn alle ongeveer even groot, alle sporen werken dus samen; terwijl bij onregelmatige stofdeeltjes de grotere en de kleinere kransen door elkaar komen. - Wanneer u de lycopodiumplaat schuin houdt, veranderen de kransen in projectie *niet*: verschil met de aangeslagen ruit! Het veld om de lichtbron is helder en niet donker, wat klopt met de onregelmatige afstanden tussen de lycopodiumkorreltjes.

Adem zelf op een ruit, van een afstand van 30 tot 60 cm, onderzoek en meet de gevormde kransen. Merk op dat de kransen bij het verdampen van het aanslag niet groter worden: de druppeltjes worden dus minder bol, maar niet kleiner van omtrek.

Let op de kransen die zich soms vormen in de ademwolken die u 's winters uitpuft: de bruine zoom van de aureool heeft een straal van $7^{\circ}$-$9^{\circ}$.

1) Donle, Ann. d. Phys. **34**, 814, 1888. - K. Exner, Sitzungsber. Akad. Wien, **76**, 522, 1877; **98**, 1130, 1889.

Kransen kunnen zich ook vormen op *berijpte* ruiten[1)]; de bruine zoom van de aureool heeft een straal van ongeveer 8°.

Meet de kransen aan lycopodiumpoeder, bereken de afmetingen der korreltjes, en controleer onder 't mikroskoop.

## 163. Lichtkransen die in het oog ontstaan.[2)]

's Avonds zie ik een zwakke lichtkrans om booglampen en alle zeer heldere lichtbronnen die zich tegen een diepdonkere achtergrond aftekenen. Ook om de maan zie ik hem bij onbewolkte lucht; en om de felle zon, als die hier en daar door het dichte gebladerte van een boom priemt. De straal van de lichtcirkel bedraagt ongeveer 6°. Hij is gekleurd, binnen blauw, buiten rood: 't moet dus een buigingsverschijnsel zijn, geen breking; de gelijkenis met de kransen in de wolken is opvallend. En toch is er een zeer duidelijk verschil: stel ik mij achter de hoek van een huis, zodat dit net de maan voor mij bedekt, dan blijft een ‘wolkenkrans’ nog steeds zichtbaar; met de ‘oogkrans’ is dat niet zo, die verdwijnt geheel zodra ik de lichtbron afscherm: hij ontstaat dus klaarblijkelijk *in het oog zelf* (‘entoptisch’).

Zijn het dus kleine korreltjes in het oog, alle ongeveer even groot, die het licht buigen op dezelfde wijze als lycopodiumpoeder of de waterdruppeltjes van de wolken? Bij sommige personen is dat inderdaad het geval.

Maar bij andere waarnemers blijken de lichtkransen sterker en duidelijker te worden als het oog voorzichtig aan dampen van osmiumzuur wordt blootgesteld. In die gevallen zijn het de cellen van het hoornvlies die als even zovele hobbeltjes uitpuilen en die voldoende regelmatig van grootte zijn om door buiging een krans te vormen. Een bepaald waarnemer geeft voor zulk een krans de volgende afmetingen op: rode rand van de aureool, straal = 1°23'; blauwgroene ring, 3°46'; rode ring, 4°22'.

Een derde soort entoptische lichtkransen is die welke ik zelf waarneem, en welke het veelvuldigst schijnt voor te komen. Dat de verklaring hier een geheel andere is dan bij wolkenkransen, blijkt al uit het feit, dat ik soms weken lang *bepaalde sektoren* van de krans bijzonder helder zie; dit is bij buiging door korreltjes ondenkbaar! Neem een stukje papier, doorboord met een gaatje van 2 mm middellijn, en houd dit vóór de pupil, eerst centraal, dan meer en meer naar de rand der pupil toe: er blijven

1) Reeds bij Musschenbroek, Introd. ad Philos. nat. (1762), II, § 2450.
2) A. Gullstrand in Helmholtz, Physiologische Optik, 3e uitg., I, 192.

nu van de krans slechts twee stukjes meer over; als het gaatje zich vóór de onderkant der pupil bevindt, zijn dit het stuk links en het stuk rechts van de lichtbron; en is het gaatje rechts of links, dan zien we de krans onder en boven. Hieruit besluiten we, dat deze krans ontstaat *door buiging van straalsgewijs lopende vezels*, wellicht in de kristallens; want dàn begrijpen we al de bijzonderheden der proef (ga dit na!). De proef met het kleine gaatje is een scherp herkenningsmiddel om deze derde soort entoptische kransen van de twee vorige te onderscheiden. Want als de buigende deeltjes korreltjes zijn en geen vezels, wordt de lichtkrans door het afschermen alleen verzwakt, maar over zijn gehele omtrek in dezelfde mate.

Soms is de krans voor mij een tijd lang vrijwel onzichtbaar, tenzij als ik schuin naar boven kijk, of als ik zeer vermoeid ben. Op andere tijden zie ik hem voortdurend.

Uit dergelijke ervaringen kunnen we nog nauwkeuriger aangeven in welk deel van het oog deze krans zich vormt. Hij verschijnt namelijk, als ik 's avonds mijn blik net naar een lantaren gericht heb, maar een paar sekunden later is hij weer verdwenen; het is mij gebleken, dat dit daarmee samenhangt dat het oog zich aan de duisternis had aangepast, en bij het zien van het felle licht reageert door samentrekking van de pupil. Vandaar dat iemand die midden in de nacht wakker wordt en plotseling een kaars of een lamp ziet, deze kaars zo bijzonder sterk waarneemt.[1)] Het lijkt waarschijnlijk, dat de krans zich vormt in de buitenste delen van de kristallens, en dus verdwijnt zodra de pupil zich heeft samengetrokken.

Bij deze buigingsverschijnselen aan korreltjes of vezels binnen in het oog is het verband tussen de buigingshoek en de grootte der buigende deeltjes ingewikkelder dan gewoonlijk[2)].

> Onderzoek en meet de entoptische kransen in 't licht ener gele natriumlamp zoals er langs veel grote straatwegen en in sommige stations gebruikt worden.

## 164. Groene en blauwe zon.[3)]

Een waarnemer bericht, dat hij naar de zon heeft gekeken dwars door de stoomzuil die uit de schoorsteen van een lokomotief ontsnapte. Bij drie bepaalde puffen vertoonde de zon een helder-

1) Vgl. een dergelijke waarneming van Descartes in Goethe, Farbenlehre, I, nr. 91, 92.
2) H. Salomonsohn, Arch. Anat. u. Physiol., Physiol. Abt., blz. 187, 1898.
3) Nat. **37**, 440, 1888. - Quart. Journ. **61**, 177, 1935.

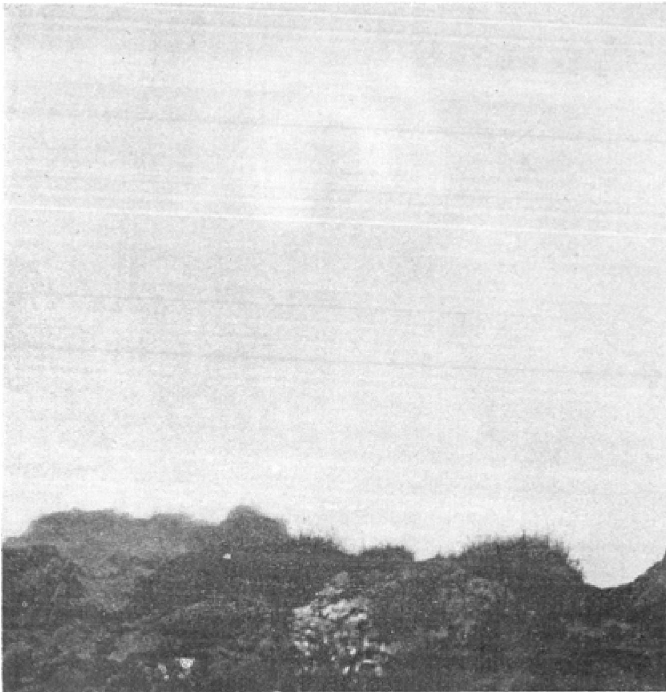
groene kleur, bij al de andere puffen was er niets bijzonders te zien. Ik heb zelf zulk een verschijnsel eenmaal waargenomen toen een lokaaltreintje vertrok. De (vrij ouderwetse) lokomotief zond dampwolken in de lucht, die de laagstaande zon telkens even verduisterden; naarmate zulk een wolk gaandeweg dunner werd en optrok, kwam er een ogenblik waarop men de zonneschijf weer zag verschijnen, en wel had ze nu eens een heldergroene, dan een lichtblauwe kleur, of zelfs zag men de ene dezer kleuren in de andere overgaan. Een breukdeel van een sekunde later was het licht zo fel en de damp zo ijl, dat er niets meer waar te nemen viel.

Zulke verschijnselen komen te voorschijn, als de druppeltjes water waaruit de stoom bestaat zeer klein zijn, nl. tussen 1 en 5 $\mu$. In dit geval is de werking die zij op het licht uitoefenen niet meer te beschrijven door de druppeltjes vervangen te denken door kleine openingetjes of ondoorzichtige schijfjes die het licht buigen. Men krijgt een voorlopig denkbeeld van de verschijnselen, door de samenwerking te onderzoeken van het gebogen licht, het aan de oppervlakte teruggekaatste licht en het rechtstreeks doorgelaten licht.[1)]

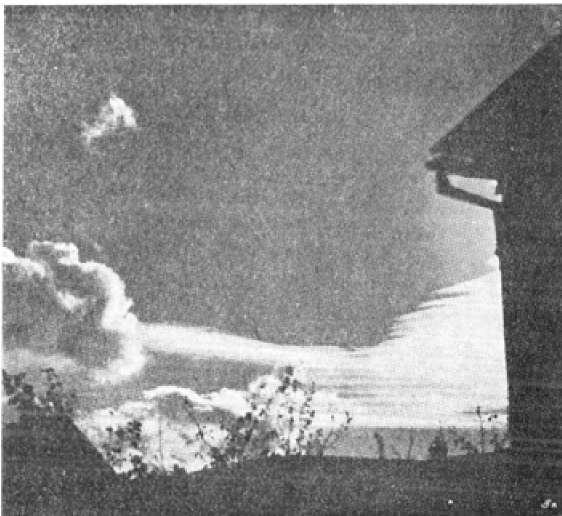
Uren lang aanhoudende groene, bleekblauwe en azuurblauwe kleuren van de zon en de maan zijn herhaaldelijk in de natuur waargenomen zonder dat stoom daarbij een rol speelde, en wel het mooist in de jaren volgende op de beroemde uitbarsting van de Krakatau (1883).[2)] We weten dat er toen ontzaglijke hoeveelheden uiterst fijn vulkanisch stof tot in de hoogste lagen van de dampkring geslingerd zijn, die jaren nodig gehad hebben vóór ze bezonken, en zich in die tussentijd over de hele wereld verspreidden, overal de prachtigste zonsop- en ondergangen teweegbrengend. Men kan zich voorstellen dat op bepaalde dagen de voorbijtrekkende stofwolken uit zeer fijne korreltjes van een zelfde grootte bestonden, hetgeen dan de zeer opvallende kleuren van de zon zou verklaren.

Bij dezelfde groep verschijnselen is een abnormale krans te rangschikken die eens in de nevel waargenomen is:[3)] een fel geelgroene aureool werd gevolgd door een brede rode en een blauwe ring, terwijl ook groene kleuren niet ontbraken. De verklaring is stellig te zoeken in de kleine afmeting der neveldruppeltjes.

1) R. Mecke, Ann. d. Phys. **61**, 471, 1920; **62**, 623, 1920. Het latere werk van H. Blumer heeft echter bewezen hoe voorzichtig men met deze benaderingen moet zijn (Zs. f. Phys. **32**, 119, 1925 en **38**, 304, 1926).
2) Kiessling, Met. Zs. **1**, 117, 1884. - Nat. 1883.
3) H. Köhler, Met. Zs. **46**, 164, 1929.



PLAAT IX*a*. Glorie of ‘het spook van de Brocken’. De schaduw van het fototoestel tekent zich af op een mistbank; zij is omringd door de aureool en een lichte ring.
Naar K. Heller, Photogr. Korrespondenz, **42**, 111, 1905 (geelfilter, orthochrom. plaat, 1 sec).



PLAAT IX*b*. Iriserende wolken. De zon bevindt zich achter de hut; de wolken rechts vertoonden ribbelvorming en iriseerden bijzonder sterk.
Naar Stanhope Eyre, Eder's Jahrb. **14**, 317, 1900.

## 165. De glorie[1)] (plaat IX*a*).

Bij lage zon, en als we ons op de top van een heuvel bevinden, kan onze schaduw zich soms aftekenen op een mistlaag; daarbij komt het voor, dat wij om de schaduw van ons hoofd een krans zien, met dezelfde levendige kleuren die de kransen van zon en maan vertonen. In een bepaald geval heeft men zelfs een 5-voudige glorie waargenomen. Merk op: ieder ziet zijn eigen schaduw en die der omstanders als ze maar dicht genoeg om hem heen staan en de mist voldoende verwijderd is; maar de *gloriekrans ziet ieder alleen om zijn eigen hoofd!*

Bij het vliegen door een wolk ziet de vlieger dikwijls een krans vóór zich, en tegelijk een glorie achter zich.[2)]

De verklaring is nog niet goed bekend. De gelijkenis met de kransen heeft velen doen geloven, dat de zwerm waterdruppeltjes op een of andere manier het zonlicht terugzendt in dezelfde richting waarin het inviel, en dat die terugkerende stralen daarna op hun weg gebogen worden door andere druppeltjes, zoals bij de krans de direkte stralen gebogen werden. Het schijnt thans echter waarschijnlijk, dat de glorie reeds gevormd wordt bij de terugverstrooiing zelve.[3)]

De straal der glorie is dikwijls wisselend: sommige delen van de mist bestaan blijkbaar uit groter druppeltjes, andere uit kleiner. Als de nevel pas ontstaat, vindt men dat de glorie zeer groot is; de daaruit berekende grootte der druppeltjes is soms niet meer dan 6$\mu$.

Dikwijls vertoont zich om de glorie nog de nevelboog, - eigenlijk altijd, wanneer de afstand van ons oog tot de nevel maar groter is dan een 50-tal meter. Het is merkwaardig dat de nevelboog veel verder verwijderd lijkt, de glorie veel dichter bij ons:[4)] psychologische invloeden moeten hier een rol spelen.

Het tegelijk waarnemen van die twee verschijnselen geeft een mooie gelegenheid om te onderzoeken of de gewone theorie van de kransen op de glorie toegepast kan worden. Men kan immers de grootte der druppeltjes berekenen uit de straal van de glorie volgens § 161, en ook uit de straal van de nevelboog (§ 128). De vraag is nu of er dan hetzelfde uitkomt. - Die overeenstemming laat wel te wensen over: de nevelboog geeft

1) W. Schmidt, Met. Zs. **33**, 199, 1916. - W. Milch, Met. Zs. **43**, 295, 1926.
2) Douglas, Met. Mag. **56**, 67, 1921.
3) B. Ray, Proc. Ind. Ass. **8**, 23, 1923. - Nat. **111**, 83, 1923.
4) Tyndall, Phil. Mag. **17**, 244, 1883.

altijd hoger waarden dan de glorie, sons zelfs 3 maal zo grote uitkomsten! Het is wel waar dat de formule voor de nevelboog hoge eisen stelt aan de meetnauwkeurigheid, maar zulke opvallende en stelselmatige afwijkingen mochten toch niet voorkomen.

Onbevredigend zijn de uitkomsten ook als men de straal der druppeltjes berekent uit twee verschillende ringen der glorie, onmiddellijk na elkaar gemeten: men vindt des te kleiner waarden naarmate men ringen gebruikt heeft die verder naar buiten liggen. Met andere woorden: de middellijnen der opeenvolgende ringen zijn niet geheel zoals men uit de theorie der kransen zou afleiden. - De gehele verklaring is blijkbaar nog niet in orde.

*.... gij zijt, zoals*
*De man die langs de helling westwaarts stijgt*
*In winterochtend, als de dichte mist*
*Het kronkelpad met glinstering bedekt.*
*Dan ziet hij voor zich, glijdend zonder tred,*
*Een beeltenis met een lichtkrans om het hoofd.*
*Verliefd bewondert hij de fraaie kleuren,*
*Niet wetend dat hij zelf de schaduw schept*
*Die hij vervolgt.*
*S.T. Coleridge.*

## 166. Iriserende wolken[1] (plaat IX*b*).

Wie niet gewoon is de hemel aandachtig te bekijken, zal verbaasd zijn te horen dat de wolken soms de prachtigste, zuiverste kleuren kunnen vertonen: groen, roodpurper, blauw,.... De kleuren die we bedoelen hebben niets te maken met de schemeringsverschijnselen, en verschijnen evengoed bij hoge als bij lage zon. Ze zijn onregelmatig over de wolkjes verdeeld, als gekleurde omzomingen, vlekken, banden; verschillende waarnemers beweren[2] dat ze een ‘metallische’ glans hebben (wat wordt daarmee bedoeld?). Het zien van dergelijke wolken geeft een groot genot, dat moeilijk te beschrijven is, maar waar stellig de zuiverheid der kleuren, hun zacht ineenvloeien en het helderstralende licht voor een niet geringe mate toe bijdragen. Men kan de ogen van dit verrukkelijke schouwspel niet afwenden.

1) H. Van der Linden, Hemel en Dampkring, 1, blz. 3, 248, enz.; 1903. - A. Bracke: Nuages irisés (Mons, 1907). - Ch.F. Brooks, M.W.R. 53, 49, 1925. - H. Köhler, Met. Zs. **46**, 161, 1929, geeft een verwarde theorie die van optisch standpunt geheel onhoudbaar is.
2) Ruskin, Modern Painters, I pars 2.

Zulke *iriserende wolken* schijnen in alle jaargetijden, maar vooral in de herfst voor te komen. Ze verschijnen dicht bij de zon: binnen afstanden van $2^o$ van de zon zijn de wolken meestal verblindend wit; op afstanden van $3^o$ tot $10^o$ is de irisering het vaakst te zien indien men met een zwart glas waarneemt; van $10^o$ tot $30^o$ is het iriseren voor het onbeschermde oog het meest voorkomend, en ziet men vooral purperrood en groen, bleker wordend met de afstand. Slechts zeer enkele waarnemers hebben wel eens iriserende wolken op grotere afstanden waargenomen (tot $50^o$), en zelfs ook omstreeks het tegenpunt der zon (Brooks, t.a.pl.).

De lichtsterkte is dikwijls zó fel, dat veel waarnemers moeite hebben om ze te verdragen. Plaats u altijd in de schaduw van een huis of boom, of vergemakkelijk de waarneming op een der wijzen aangegeven in § 160.

Na lang turen naar de iriserende wolken, zonder gebruik te maken van deze hulpmiddelen, heb ik wel eens ondervonden dat het mij ‘groen en blauw’ voor de ogen werd - of liever: purper en groen, want dit zijn de kleuren die men als nabeeld van zulke felle lichtindrukken bewaart (§ 90). En nu zijn het net ook de tinten die bij iriserende wolken het best vertegenwoordigd zijn! Zodat ik mij haast ging afvragen of het hele verschijnsel niet een gevolg was van vermoeienis der ogen. - Dit is echter stellig niet zo: want twee verschillende waarnemers zien de kleuren op dezelfde wijze; ze blijven zichtbaar, als men het licht op de hoger aangegeven wijze dempt; en tenslotte is de irisering dikwijls ook te zien aan wolken die betrekkelijk weinig helder zijn.

Tinten zijn vrijwel altijd in de wolken te zien als de lucht gebroken bewolkt is, ze ontbreken alleen bij zeer lage zon, of als de hemel er helemaal wit in plaats van blauw uitziet. Men kan drie groepen onderscheiden.

1. Het prachtigst iriseren de helderglanzende witte alto-stratuswolkjes, die welhaast op vederwolken lijken, maar vlokkiger gebouwd zijn en op lager niveau zweven; dat ze niet zéér hoog zijn kan men soms zien als zich bij ‘watertrekken’ van de zon de schaduwen van hoge cumuli op hen aftekenen, of als ze bij zonsondergang minder lang verlicht blijven dan de echte cirri.

2. Cirrocumuli en altocumuli iriseren soms ook mooi; in dit en in het vorige geval zijn de kleuren gerangschikt in strepen, banden, ‘ogen’. Het iriseren is vooral te zien als de wolken zich snel vervormen, kort voor en na een storm.

3. Cumuli, cumulonimbi en cumulostrati iriseren alleen aan

de randen; het licht is daar echter zo fel, dat de waarneming zonder zwarte spiegel (of een dergelijk hulpmiddel) niet goed mogelijk is; fraai is het schouwspel van een cumulus die bezig is zich op te lossen en over de zon heen trekt! Overigens is het nog de vraag of de tinten in dit derde geval beschouwd kunnen worden als ‘echt’ iriseren, en of ze tot hetzelfde verschijnsel als 1 en 2 te rekenen zijn.

De rangschikking der kleuren moet ons belangrijke aanwijzingen geven omtrent de wijze waarop ze ontstaan. Bij de eerste blik lijkt de verdeling der kleuren zeer onregelmatig; maar weldra beginnen we wetmatigheden te ontdekken. In wolken *op ietwat grote afstand* van de zon, is de verdeling der kleuren klaarblijkelijk bepaald door *de struktuur van de wolk*: bepaalde vegen vertonen in hun geheel dezelfde kleur, of men ziet een purperrode zoom om de wolk, enz. Zijn de wolken *dichter bij de zon*, dan is *de afstand* de hoofdfaktor. Men bemerkt bijvoorbeeld dat de wolken beginnen te iriseren, telkens als ze een bepaalde plaats aan de hemel bereikt hebben; of de kleuren zijn in min of meer onregelmatige ringen om de zon gerangschikt.

Het ligt voor de hand, aan te nemen dat de iriserende wolken niets anders zijn dan delen van kransen. Welke kleur op een gegeven punt ontstaat, hangt af van het produkt:

grootte der deeltjes × hoekafstand tot de zon (vgl. § 161).

Het is dan duidelijk dat bij grote hoekafstand de afmetingen der wolk te verwaarlozen zijn, en dat alle delen beschouwd kunnen worden als even ver van de zon verwijderd; de kleur wordt dan bepaald door de grootte der deeltjes, die merkbaar anders kan zijn aan de randen van een wolk dan in het midden. (§ 161). Bij kleine hoekafstand daarentegen zullen de variaties van deze faktor de hoofdrol spelen. Volgens deze onderstelling zouden iriserende wolken gekenmerkt zijn door druppeltjes die zeer gelijkmatig van afmeting zijn in elk bepaald gedeelte van de wolk, hoewel niet even groot in de verschillende delen. - Niet iedereen verenigt zich met deze theorie, maar een betere is er m.i. niet.

Zeer belangwekkend zijn de iriserende wolken op afstanden groter dan 30$^{o}$ van de zon. Dikwijls is wat men aldus heeft waargenomen eenvoudig een stuk halo. Maar er zijn bepaalde gevallen waarin de waarneming onbetwistbaar is; ik heb ook zelf zulk een geval meegemaakt. Men zou dan moeten denken aan uiterst kleine deeltjes (2 μ!), of aan buiging door gevederde ijskristalletjes die een soort buigingsrooster zouden vormen.

Het licht der iriserende wolken is *niet* gepolariseerd.



PLAAT X.
Paarlemoerwolken.
Naar C. Störmer, Geofysiske Publikadjoner, IX, No. 4, 1931, Taf. III. Cliché in bruikleen van de Akademie der Wetenschappen te Oslo.

Iriserende wolken om de maan zijn wel waargenomen, maar veel zeldzamer dan om de zon, en bleker van kleur, blijkbaar tengevolge van te geringe lichtsterkte.

Een enkele maal is het iriseren waargenomen bij de kunstmatige wolken, waarmee een vliegtuig hoog in de lucht zijn reklameletters schreef!

## 167. Paarlemoerwolken[1)] (plaat X).

Een zeer zeldzame soort iriserende wolken, op veel groter schaal dan de gewone vormen: hele wolkenbanken die soms iriseren als visschubben, soms prachtig gekleurd zijn in zuivere tinten. Ze vertonen zich bijzonder mooi tegen zonsondergang, op afstanden van $10^{o}$ tot $20^{o}$ van de zon. Kenmerkend is, dat ze *nog wel twee uur na zonsondergang* zichtbaar blijven; dit wijst op een zeer grote hoogte![2)] Onlangs is die met nauwkeuriger methodes bepaald op 25 km, terwijl de gewone wolken nooit hoger dan 12 km voorkomen. Als de paarlemoerwolken op een gegeven ogenblik donker worden, geschiedt dit *vrij plotseling*, in ongeveer 4 minuten: dit is nl. de tijd die de zonneschijf nodig heeft om achter de gezichteinder onder te gaan. Zo wordt het zeer waarschijnlijk, dat ze inderdaad nog rechtstreeks door de zon verlicht worden, niet door de schemering.

De kleuren zijn in hun rangschikking bijna geheel door de plaats in de wolk bepaald. Soms zijn deze wolken streperig, golvend, cirrus-achtig, de hele wolkenbank éénkleurig bijna, met spektraalkleuren aan de randen of in langwerpige horizontale rijen; daartussen ziet men de achtergrond van de hemel, vreemd opaalkleurig, grauwbruin, blauwwit. De kleuren kunnen constant blijven, andere malen veranderen ze geleidelijk; ze verdwijnen zodra de afstand van de zon een $40^{o}$ overschrijdt. Het gehele tafereel is van een onbeschrijfelijke grootsheid en schoonheid.

*De kleuren veranderen als men de wolken door een nicol bekijkt en hem draait*. Paarlemoerwolken schijnen te bestaan uit ijskristalletjes, want men heeft er eenmaal een kring in kunnen waarnemen (vgl. § 134). Zij vormen zich vooral als een depressie net voorbijgetrokken is, en de lucht er zeer helder uitziet. Men

1) Mohn, Vid. Selsk. Forh. Christiania 1893, nr. 10. - C. Störmer, Geofysiske Publikasjoner, **9**, No. 4, 1931; Beitr. z. Geoph. **32**, 63, 1931.

2) Uit de tijd gedurende dewelke ze belicht blijven volgt de hoogte; nauwkeurige berekeningen in Mohn, Met. Zs. **10**, 82, 1893 en Vid. Selsk. Forh. t.a.pl., ook bij Jesse, Met. Zs. 1886, enz.

ziet ze te Oslo meest in de winter, als er een diep minimum ten N. of ten O. ligt, terwijl het stormt over de Atlantische Oceaan en een warme, droge wind blaast ('föhnwind'): de hemel is dan zeer helder en men kan de hoogste lagen waarnemen.

Een buitengewoon mooie ontwikkeling van paarlemoerwolken is waargenomen op 19 Mei 1610, de dag waarop de aarde door de staart van de komeet van Halley is gegaan. Een verband tussen de twee verschijnselen lijkt zeer waarschijnlijk.[1)]

Over ultracirren en lichtende nachtwolken: vgl. § 198, 199.

## *Heiligenschijn*.

### 168. De heiligenschijn op bedauwd gras.[2)]

In de vroege ochtend, als de zon nog laag is, en onze lange schaduw op bedauwd gras valt, bemerken we een merkwaardige lichtaureool, ongekleurd, die zich naast en vooral boven de schaduw van ons hoofd uitstrekt. - Neen, het is geen gezichtsbedrog, geen kontrastverschijnsel: als de schaduw op de grintweg valt ziet u de lichtschijn niet meer.

Het verschijnsel is het mooist als de schaduw tenminste een 15 meter lang is, en als ze valt op kort gras of klaver, die met zóveel fijne dauwdruppeltjes bedekt zijn dat ze grijswit lijken; in zulke omstandigheden is de heiligenschijn uitermate sterk. Minder duidelijk is hij midden op de dag na een regenbui, of 's avonds in het licht van sterke elektrische lampen. Als men twijfelt, kan men zich volgenderwijze het best overtuigen van het verschijnsel:

1. overzie het geheel van het grasveld, en bemerk hoe het licht nabij uw schaduw toeneemt;
2. doe enige stappen: u ziet de lichtschijn met u meegaan; plaatsen waar het gras niet bijzonder helder was worden verlicht als de schaduw nadert;
3. vergelijk uw schaduw met die van andere mensen: u ziet de heiligenschijn alleen om uw eigen hoofd! (Filozofeer daarover ....). Benvenuto Cellini, de beroemde Italiaanse kunstenaar van de 16e eeuw, had dit opgemerkt, en dacht dat die lichtglans het teken was van zijn genialiteit![3)]

1) Slocum, J.R.A.S. Can. **28**, 145, 1934, met mooie foto.
2) Quart. Journ. **39**, 157, 1913. - E. Maey, Met. Zs. **39**, 229, 1922.
3) Autobiografie, boek I, hoofdst. 128.

Wat is de verklaring voor dit eigenaardig verschijnsel? - De dauwdruppels zijn stellig wel zeer essentieel: is de dauw eenmaal verdampt, dan is de heiligenschijn zo goed als verdwenen; men kan hem weer doen ontstaan door waterdruppels op het gras te sprenkelen. Waterdruppels die men op een wit laken of op wit papier gesprenkeld heeft, schitteren duidelijk als de schaduw van ons hoofd dichtbij hen valt.

Vul een bolvormig glazen kolfje met water, en houd het in de zonnestralen: het stelt als 't ware een dauwdruppel in 't groot

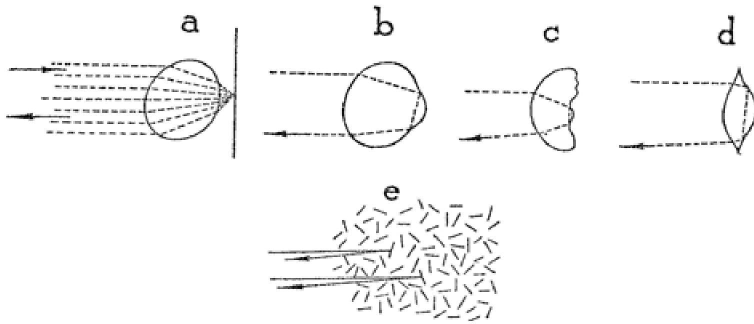



Fig. 135. Het ontstaan van de 'heiligenschijn' op bedauwd gras.

voor. Een blad papier erachter vervangt het grasprietje waarop de druppel zich gevormd heeft. Als we naar dit kolfje kijken van uit een richting die slechts een kleine hoek met de invalsrichting vormt, zien we het kolfje helder verlicht, mits het papier even achter het kolfje gehouden wordt, ongeveer op de plaats van het brandpunt.

Zo komen wij ertoe, aan te nemen dat elk der dauwdruppeltjes een zonnebeeldje vormt op het blad waarop het zich bevindt; omgekeerd gaan er ook stralen van dat beeldje uit, vrijwel langs dezelfde weg langs waar ze gekomen zijn, dus ongeveer in de richting naar de zon toe (fig. 135*a*). Dit zou verklaren waarom de druppels als 't ware van binnen uit licht schijnen te geven: iets dergelijks als het lichten der ogen van een kat.[1)] Het verklaart ook voortreffelijk waarom men zoveel licht ziet uit het tegenpunt

1) Vgl. ook de ophthalmoskoop van Helmholtz; het lichtmos (Schistostega Osmundacea), enz. Zie § 229.

der Zon, en dat de lichtsterkte snel afneemt als men zich daarvan verwijdert.

Maar waarom is dat licht dan niet *groen*?

Er moeten nog andere faktoren in 't spel zijn. Als we nog eens ons kolfje met water bekijken, zien we dat er ook weerspiegeling is tegen de achterkant en tegen de vóórkant; men schat gemakkelijk, dat het eerste een ongeveer half zo grote helderheid teweegbrengt als de remissie van de bladeren; het tweede, een helderheid van ⅛ maal zoveel. Maar er komt ook zeer veel sterker licht van de hals en de platte bodem, licht dat totale terugkaatsingen heeft ondergaan! En dit is bij onze dauwdruppels waarschijnlijk het belangrijkste: de druppels zijn onregelmatig vervormd (fig. 135*b, c, d*), vooral op behaarde, wit-wollige planten, en het licht wordt op allerlei plaatsen door totale terugkaatsing gespiegeld, fel en wit zoals het van de zon was gekomen. Deze tweede groep faktoren vertoont op zichzelf geen uitgesproken voorkeur voor terugkaatsing volgens de invalsrichting. Maar daar is nu een vernuftige opmerking gemaakt: alleen de grasssprietjes die door de zon bereikt worden stralen zelf; en die welke door de zon bereikt worden zijn dus in de richting naar de zon toe niet afgeschermd door andere sprietjes, terwijl ze in de meeste andere richtingen geen vrije opening voor zich zullen zien (fig. 135*e*). Vandaar dat een waarnemer die ongeveer in de invalsrichting kijkt, altijd meer licht ziet. - Dit merkwaardig simpele beginsel (afkomstig van Richarz) was al in de sterrekunde gebruikt om de lichtverdeling in een wolk van kleine steentjes te begrijpen (ring van Saturnus!).

De combinatie van de verschillende hier genoemde lichteffekten schijnt wel voldoende om zowel de witheid als de gerichtheid van de heiligenschijn te verklaren.

*Aanschouw den dauw op jong plantsoen,*
*Zacht-donkerwit op donkergroen,*
*Teergrijs op grauw.*

*Klein, kleine, fijne, drop op drop,*
*Met in de plooi een zwaren knop.*
*Aanschouw den dauw.*

*Aanschouw den dauw vóór dag en gloed.*
*Gelijk de frischheid van 't gemoed*
*Verdampt hij gauw.*

*Straks breekt de zon door boom en heg,*
*En kust en brandt uw paarlen weg ....*
*Aanschouw den dauw.*

*R. de Clercq, Uit de Diepten* (1911).

## 169. Heiligenschijn op niet-bedauwde oppervlakken.

Dit verschijnsel is veel moeilijker te zien, en de hulpmiddelen die we in § 168 aangegeven hebben zijn wel zeer nodig. Men heeft het waargenomen op stoppelvelden, op kort gras, en zelfs op ruwe grond; ik heb het onmiskenbaar en duidelijk gezien bij lage zon, op een grasveld dat geregeld met de snijmachine wordt geknipt en waarvan alle sprietjes mooi loodrecht en even lang waren; nog duidelijker was het op de pollen pijpestrootjes (Molinia coerulea), vooral wanneer men langzaam voorbijfietste. Als de waarnemer zeer ver van het grasveld verwijderd is, bijvoorbeeld enige honderden meters, is zijn schaduw zo wazig dat er bijna niets van te zien is (vgl. § 2); het enige wat dan opvalt is de heiligenschijn zelf, als een vlek van ongeveer $2^o$ groot (dus 4 maal de middellijn van de maan ongeveer), ietwat langwerpig uitgerekt in vertikale richting.[1)]

De verklaring is dezelfde welke Winterfeld voor de heiligenschijn op bedauwd gras gegeven heeft (vgl. § 168), en die we bijvoorbeeld zo kunnen formuleren: de zon beschijnt de meeste halmen dwars door de tussenruimten van de voorste rijen; wie ongeveer in de richting der zonnestralen kijkt, ziet al de verlichte vlakjes; wie opzij kijkt ziet door de tussenruimten ook veel beschaduwde sprietjes, dus een kleiner gemiddelde helderheid.

Op de luismelde (Chenopodium album) vertoont zich dikwijls een sterke heiligenschijn; de plant is geheel bedekt met een melig overtrek van ronde cellen, die blijkbaar een dergelijke rol spelen als de dauwdruppeltjes, en die vooral bij bepaalde variëteiten van deze soort sterk ontwikkeld zijn.[2)]

## 170. Heiligenschijn om de schaduw van een luchtballon.[3)]

Wie ooit het buitenkansje van een ballontocht genieten mag, lette op de schaduw van de ballonmand die zich over de aarde verplaatst. Zij is bijna altijd omgeven door een lichtaureool; en die is geen subjektief contrastverschijnsel, want ze wordt sterker als de velden en weiden bedauwd zijn, en op een korenveld gaat ze over in een vertikale lichtzuil, evenwijdig aan de richting der korenhalmen. We hebben hier een bijzonder mooi geval

1) Nat. **90**, 621, 1913.
2) v. Lommel, Ann. d. Phys. 1874, Jubelband, 10.
3) C. Flammarion, l'Atmosphère, blz. 232 (1888). - Met. Zs. **30**, 501, 1913. - Deutsche Luftfahrer Zeitung, **17**, 83, 1913.

van heiligenschijn: want tengevolge van de grote afstand van de luchtballon tot de aarde kijken we onder een uiterst kleine hoek met de invallende zonnestralen.

Zweeft de schaduw over wolkenbanken, dan heeft men kans soms een prachtig schaduwverschijnsel met gekleurde glorieringen waar te nemen (§ 128 en 165).

Is de heiligenschijn ook te zien om de schaduw van een vliegtuig?

## Licht en kleur van de lucht.

### 171. Verstrooiing van het licht door rook.

We beginnen onze waarnemingen over de verstrooiing van het licht met een wandeling langs een druk bevaren kanaal. Van de schepen die voorbijkomen, zijn er een aantal voorzien van petroleum- of benzinemotoren, die een fijne blauwe rook uitpuffen. Het is merkwaardig dat die rook, gezien tegen de heldere achtergrond van de hemel, helemaal niet blauw lijkt, eerder geelachtig. Deze rook is dus niet blauw op dezelfde wijze als blauw glas, maar omdat hij de blauwe stralen meer verstrooit dan de gele of rode. Een donkere achtergrond lijkt blauw licht te geven, omdat de rook de zonnestralen die hem van opzij treffen in alle richtingen en ook naar ons oog verstrooit. Een heldere achtergrond moet integendeel geelachtig lijken, omdat hij door de rook vooral beroofd wordt van blauwe stralen.

‘Iets dergelijks pleegde ik in vroeger jaren waar te nemen te Killarney (in Ierland), wanneer op windstille dagen de rookzuilen vertikaal boven de daken der hutten opstegen. Het onderste deel der rookzuil tekende zich af tegen een achtergrond van donkere dennen, het bovenste deel tegen heldere wolken. Het eerste was blauw omdat men het hoofdzakelijk door het verstrooide licht zag, het laatste was roodachtig omdat men het bij doorvallend licht zag’ (J. Tyndall).

Dezelfde blauwe kleur in opvallend licht en dezelfde gele kleur in doorvallend licht bemerkt men bijzonder duidelijk aan de rook die uit de uitlaatpijp der Dieseltreinen komt, op het ogenblik dat hun motoren gas geven om de trein in beweging te brengen; vrachtauto's en autobussen met Dieselmotor vertonen hetzelfde. Of aan de rook van dorre bladen, onkruid en afval, die men hier en daar op het veld verbrandt in de herfst. Of aan de rook van onze eigen schoorsteen thuis, als men het vuur met hout aanmaakt. - In al die gevallen bestaat de rook uit buitengewoon kleine, teerachtige vochtdruppeltjes, terwijl de gewone

verbranding van steenkool vlokjes roet oplevert, die veel grover zijn. En van de afmeting der verstrooiende deeltjes, vergeleken met de golflengte $\lambda$ van 't licht (0,0006 mm), hangt de kleur van de rook af. Bij deeltjes die niet groter zijn dan een of twee tienden van een golflengte, is de verstrooiing evenredig met $1 / \lambda^4$, en neemt dus snel toe naar het violette eind van het spektrum: dergelijke kleine deeltjes, van welke aard ook, verstrooien altijd een mooi blauw-violet licht. Bij grotere deeltjes is die toeneming veel minder uitgesproken, en is de verstrooiing bv. evenredig met $1 / \lambda^2$. Bij zeer grote deeltjes is de golflengte-afhankelijkheid onmerkbaar, en 't verstrooide licht wit; - ‘zeer groot’ is hier alweer ten opzichte van de golflengte bedoeld, dus bv. 0.01 mm!

Vandaar dat de rook van sigaar of sigaret blauw is als men hem onmiddellijk uitblaast, maar wit wordt als men hem eerst even in de mond houdt: de rookdeeltjes bedekken zich dan met een watermantel en worden veel groter.

De stoom van een lokomotief is blauwachtig vlak bij de uitlaatopening van de veiligheidsklep, iets verder is hij wit: de condensatie neemt toe en de druppeltjes groeien. - Let op het verschil tussen de *rook* en de *stoom* van de lokomotief, zowel bij op- als bij doorvallend licht, en verwar die nooit!

Tot hiertoe hebben wij gelet op de verstrooiing aan betrekkelijk ijle rookwolken. *Bij zeer dichte rook* worden de verschijnselen ingewikkelder: dan wordt het licht herhaaldelijk verstrooid en van het ene deeltje naar het andere geworpen. Let op de rook der hopen dorre blaren die men op het veld verbrandt: aan de randen van de rookzuil is de tint mooi blauw, zoals altijd bij houtvuur; maar in de middengedeelten, waar de rook het dichtst is, vertoont hij een bijna witte kleur. - Men kan gemakkelijk aantonen dat voldoende dikke lagen altijd wit licht terugverstrooien, al is de verstrooiing van *elk deeltje* nog zo blauw. Want alle licht dat op de rookwolk valt moet altijd eindigen met er weer uit te komen, - althans indien er alleen verstrooiing en geen absorptie is (§ 176).

De rook onzer schoorstenen en fabrieken is gewoonlijk zwart in opvallend licht, ook al is de rookzuil dik en ondoorzichtig: hier zijn dus de roetvlokjes niet alleen verstrooiend, maar ook sterk absorberend. IJle lagen van dergelijke rook vertonen de hemel in doorzicht bruin; toch is de kleur van de rook in opval-

lend licht nauwelijks blauwachtig te noemen: het is dus de absorptie, die bij koolstof toevallig snel van het rood naar het violet toeneemt. Denk aan de bloedig-rode kleur der zon, gezien dwars door de rook van een brand!

## 172. De blauwe lucht.[1)]

*Boven de wolken is de hemel altijd blauw!*
*H. Drachmann.*

In eeuwige schoonheid welft zich de blauwe hemel om de Aarde. Dit blauw heeft iets onpeilbaars, het is alsof men er al de diepte van kon zien. Het is getint in oneindige schakeringen, het verschilt van dag tot dag, van het ene punt van de hemel tot het andere.

Wat is de oorzaak van die blauwe kleur? Het is niet, dat de dampkring zelf licht uitzendt, want dan zou hij ook des nachts moeten stralen. Het is ook niet dat er een lichtgevende blauwe lichtbron achter zit 's nachts ziet men, hoe mooi donker de achtergrond is tegen dewelke de dampkring zich ons vertoont. De blauwe kleur is dus eigen aan de dampkring zelf. Toch is het geen gewone absorptiekleur, aangezien de zon en de maan volstrekt niet blauw, maar veeleer geelachtig getint zijn. - Het is dus net zulk een geval zoals bij zeer fijne rook! En we komen tot de onderstelling, dat het licht van de lucht eenvoudig verstrooid zonlicht is. We weten dat de verstrooiing van kleine deeltjes des te sterker is naarmate wij het violette einde van het spektrum naderen: de kleur van de hemel is dus samengesteld uit veel violet (waarvoor ons oog niet erg gevoelig is), nogal wat blauw, een weinig groen en zeer weinig geel en rood; de mengkleur van al die stralensoorten is hemelsblauw.

Wat zijn nu die stofjes in de dampkring die het licht verstrooien? In de zomer, na een lange periode van droogte, is de lucht vervuld met talloze deeltjes zand of klei die door de wind meegevoerd zijn en het landschap in de verte onduidelijk maken: juist dan ziet de lucht er weinig blauw en veeleer witachtig uit. Maar na enige flinke regenbuien, als al het stof door de regen weggespoeld is, wordt de lucht helder en doorzichtig, de hemel diepblauw en verzadigd van kleur. Zodra er hoge cirruswolken ver-

1) De beroemde Zwitserse geoloog A. Heim heeft een prachtig boekje geschreven, getiteld: Luftfarben (Zürich 1912), waarin hij op populaire en geestdriftige wijze de kleuren van de lucht en de schemeringsverschijnselen beschrijft. De gekleurd weergegeven aquarellen zijn onvergelijkelijk mooi.

schijnen, en de lucht zich met ijskristalletjes vult, verdwijnt het mooie blauw en gaat het in een veel witter kleur over. Het zijn dus noch de eigenlijke stofjes, noch de water- of ijsdeeltjes die de blauwe verstrooiing veroorzaken welke aan het uitspansel zijn kleur geeft. De enige mogelijkheid is, *dat de luchtmolekulen zelf verstrooiend werken*; weliswaar zeer zwak, maar voldoende om in een laag van vele kilometers dikte een merkbare helderheid teweeg te brengen; en met een uitgesproken voorkeur voor de violette en blauwe stralen

(de $\frac{1}{\lambda^4}$-wet)

.

De blauwe en violette stralen die de lucht verstrooit heeft de zon nu tekort. Daardoor vertoont zij een lichtgele kleur, die des te meer uitgesproken wordt naarmate ze lager staat, omdat haar stralen dan een des te langer weg door de lucht hebben af te leggen. Geleidelijk gaat de kleur over in oranje en dan in rood, het zeer bijzondere rood van de ondergaande zon.[1)]

*De beroemde verstrooiingswet van Rayleigh* voor deeltjes kleiner dan 0,1 van de golflengte van 't licht luidt:

$$s = \text{const.}\ \frac{(n-1)^2}{N\lambda^4},$$

waarin $s$ = de verstrooiing per volume-eenheid, N = het aantal deeltjes per $cm^3$, $n$ = de brekingsindex.

## 173. Luchtperspektief.[2)]

*Het bosch is blauw,*
*ver tegen 't grijs -.*
*J. Reddingius, Johanneskind.*

Een bos in de verte is een uitstekende donkere achtergrond om de luchtverstrooiing waar te nemen. Hoe verder wij er vandaan zijn, hoe meer het er nevelig, blauwachtig gaat uitzien: de lange luchtlaag tussen ons en het bos, van opzij verlicht door de zonnestralen, geeft verstrooid licht dat zich op de achtergrond superponeert, zoals het licht van een sluier de voorwerpen overdekt die er achter zijn; voor deze achtergrond worden dus de tegenstellingen van lichte en donkere partijen verzwakt, hij wordt

1) Kleurschalen en kleurstatistieken der op- en ondergaande zon: zie J. Plassmann, Met. Zs. **48**, 421, 1931.
2) Heim, Luftfarben (vgl. § 172). - Vaughan Cornish, Geogr. Journ. **67**, 506, 1926.

*gelijkmatiger* en tevens *blauwer*. Onwillekeurig schatten wij de afstand van boompartijen aan de mate waarin dit *luchtperspektief* optreedt. Een boom die 100 m van ons af is heeft al een blauwiger tint dan een die naast ons staat. Het groen van de weiden wordt in de verte verrassend snel blauwgroen, daarna blauw. Heuvels in de verte zijn dikwijls mooi blauw, zoals men het zo dikwijls afgebeeld vindt in de achtergrondlandschappen van onze 16-eeuwse schilders: van Eyck, Memling. Onze begroeide duinen tussen Zandvoort en Haarlem, die oprijzen als de golven van de zee, kam na kam, al verder en verder, vertonen ook mooi de blauwende einders. Door dit luchtperspektief naderen alle tinten tot een zelfde blauwigheid, en vloeien daardoor harmonisch ineen; alleen van veel dichterbij begint men het rood der huizen en het groen der weiden te onderscheiden, en de kleurenharmonie is verbroken. Ga dit zelf na in het landschap!

Omgekeerd kunnen wij ook zoeken naar de tintveranderingen van een heldere achtergrond. In een bergland kiest men hiervoor de sneeuwbergen; wij bekijken de rijen stapelwolken, die dicht bij ons schitterend wit zijn, en verder in het landschap geleidelijk *geelachtig* worden. - Toch is het blauwe verstrooiingslicht op donkere achtergrond veel duidelijker dan de geelkleuring van de heldere partijen. In het eerste geval is het een geringe lichthoeveelheid die in de plaats komt van duisternis; in het tweede geval is het slechts een kleine verandering in een reeds aanzienlijke helderheid: het *relatieve* verschil is veel kleiner (§ 64).

In de ruime verten van ons vlakke land ontwikkelt het luchtperspektief zich in volle pracht, en door de wisselende vochtigheidsgraad overweegt nu eens de blauwe verstrooiing der luchtmolekulen, dan het sterkere, maar grijzere licht van de heiigheid der lucht. -

1. Soms strijkt een wig van hoge druk over ons, tussen twee regenbuien in, en is de lucht zeer doorzichtig en zuiver; men onderscheidt op de voorgrond de schaduwen en kleuren, en ziet de donkere partijen van de achtergrond in een purperen blauw overgaan.

2. Op een dag met wat heiigheid is de voorgrond minder rijk aan kleur, meer naar het grijze zwemend; de golvingen van het terrein op gemiddeld verre afstand komen beter uit, omdat de dalen door een dichter nevelgordijn gezien worden dan de hoogten (zie echter ook § 91); helemaal in de verte tenslotte is het zicht veel slechter geworden. -

3. Bij mooi zomerweer en hoge barometerdruk zijn er veel

stofdeeltjes in de lucht, de hemel is zeer helder maar weinig blauw, zodat de tegenstellingen van licht en schaduw minder sprekend zijn; daarenboven is de waarnemer voortdurend enigszins verblind door de heldere lucht. -

4. In het maanlicht is het landschap het mooist als er helemaal geen neveligheid is, want anders is het licht te zwak, de tegenstellingen minder in het oog vallend, en zou het tafereel allicht in een eentonig grijs kunnen overgaan.

5. Het is door het luchtperspektief dat de zeevaarder de kust blauwig en aetherisch ziet opdoemen, contrasterend met het donkerder blauw van de golven der zee, wier krachtiger vormen zich op de voorgrond van het tafereel ontwikkelen. Hem lijkt het verre land een oord van vrede, het koninkrijk van overzee ....

## 174. Proeven met de nigrometer.[1)]

'Nigrometer' is een geleerde naam voor een zeer eenvoudig hulpmiddel. Een kartonnen koker, zoals men gebruikt voor het verzenden van tekeningen, 40 cm lang en met een middellijn

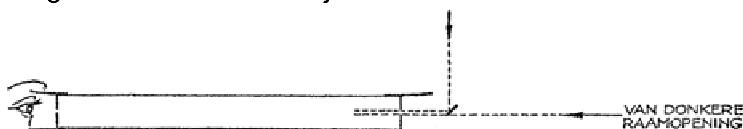
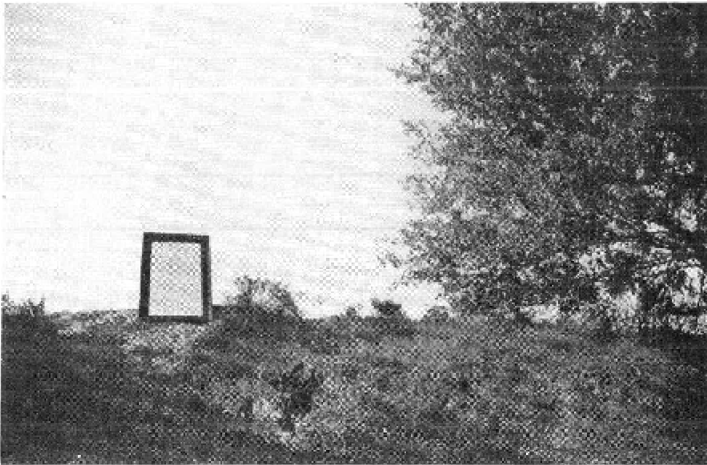



Fig. 136. Waarnemen met de nigrometer: meting van de verstrooiing van onze dampkring.

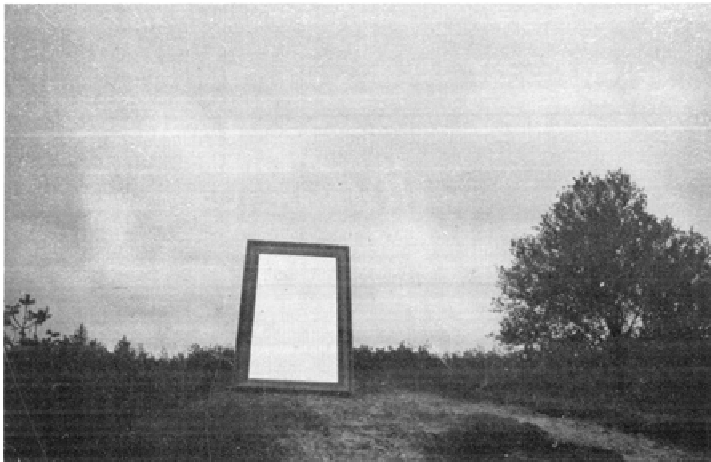
van bv. 3 cm, wordt aan beide zijden van een dekseltje voorzien. In het ene deksel knipt men een gaatje van 7 mm middellijn, in het andere een van 3 mm; dan rolt men nog aan beide zijden om de koker een kapje van zwart papier, die hem een eindje verlengt; en het toestel is klaar.

1. Als men door het toestel wil kijken, houdt men het oog achter het kleinste gaatje, en ziet dan het andere verlicht tegen een bijna volledig zwarte achtergrond. Richt de buis naar een raamopening op enige afstand; u ziet deze donkere raamopening duidelijk blauwachtig: het is 't verstrooide licht der zonbeschenen lucht tussen u en de raamopening. Nader meer en meer tot het raam: hoe dichter u komt, hoe zwakker het blauwige licht: de

1) R. Wood, Phil. Mag. 1920.



PLAAT XI.
Een grote spiegel is schuin opgesteld en kaatst het zenith terug; bij blauwe lucht is dit donkerder dan de hemel nabij de kim.



Dezelfde proef bij gelijkmatig betrokken lucht: het zenith is nu helderder.

verstrooiende luchtzuil wordt korter. Voor kleine afstanden is het nog beter, de nigrometer te richten op een van binnen zwartgemaakte kist, met kleine opening, die een bijna volmaakt 'zwart lichaam' is.

2. We gaan nu bepalen welke luchtzuil evenveel verstrooit als de gehele dampkringsdikte. Houd vóór de helft van de opening een stukje glas, waarvan de achterkant zwart is, bijvoorbeeld een stukje donker gesluierde fotografische plaat. Richt het glaasje onder $45^{o}$ met de as van de koker; als het kan, kies dan uw waarnemingsrichting zò, dat het teruggekaatste licht afkomstig is van de hemel op ongeveer $60^{o}$ van de zon. Door de andere helft van het gaatje ziet u onze donkere raamopening. Hoever moeten we ons daarvan verwijderen, willen de twee helften van het veld even sterk verlicht zijn? - Bij zonnig, helder weer vindt u ongeveer 330 meter; bij zonnig, maar ietwat heiig weer wordt die afstand misschien maar 130 m meer.
   Het terugkaatsende glaasje verzwakt het licht tot 5% van zijn sterkte (§ 52). De hemel op $60^{o}$ van de zon verstrooit dus even sterk als een luchtzuil van 330m × 20 = 6,6 kilometer. - Nu zou de dampkring, als men hem op alle hoogten tot normale dichtheid kon samendrukken, een 'aequivalente hoogte' hebben van 8,8 km (immers, de dampkring drukt met een kracht van 1,033 kg per $cm^2$, terwijl 1 $cm^3$ lucht 0,001293 g weegt; dus 1,033: 0,001293 = 880000 cm = 8,8 km). De overeenstemming met onze optische bepaling is helemaal niet slecht! Ze bewijst, dat dezelfde verstrooiende stof die hier beneden het luchtperspektief verklaart, ook het blauwe licht van de hemel doet ontstaan. Dat onze 6,6 nog iets kleiner is dan 8,8, kan bewijzen dat de lucht beneden tengevolge van haar stofgehalte meer verstrooit dan de lucht in hoge lagen. - Onze bepaling is overigens in allerlei opzichten zeer ruw en geeft alleen de orde van grootte.
3. De nigrometer vertoont ons elke kleur van het landschap afzonderlijk, vrij van de invloed der tegenstelling met haar omgeving. Sommige waarnemers zien dan alle tinten geelachtiger dan gewoonlijk; de zee en de lucht lijken hun bijna wit; komt er een wolk voorbij, dan verschijnt het blauw opnieuw![1)] Al moge dit voor anderen weer niet gelden, het blijft waar dat de nigrometer een zeer waardevol en belangwekkend hulpmiddeltje vormt.

1) J.S. Haldane, The Philosophy of a Biologist (Oxford, 1935) blz. 52.

## 175. Cyanometer.

Maak in verschillende verhoudingen mengsels van zinkwit en roetzwart met berlijns blauw of met kobaltblauw. Deze mengsels verschieten niet, men kan ze op repen karton brengen, nummeren en met de hemelkeur vergelijken. - Voor waarnemingen op reizen is deze methode nog altijd zeer bruikbaar; de samenstelling van het licht der verschillende nummers van de schaal kan naderhand colorimetrisch onderzocht worden.

Dergelijke schalen zijn voor het praktische gebruik samengesteld, en kant en klaar in de handel te krijgen.[1)]

Het is van belang bij het gebruik dezer blauwschalen altijd de rug naar de zon te draaien en de schaal door de zon te laten beschijnen.

## 176. Lichtverdeling aan de hemel.

Onderzoek op een heldere dag hoe de belichting over de hemel verdeeld is. Wie een cyanometer heeft, kan die hierbij gebruiken;

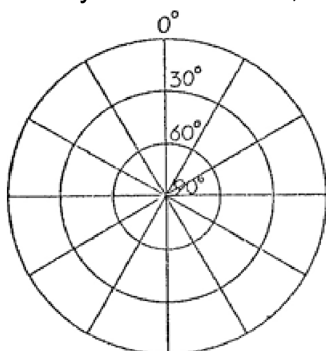



Fig. 137. Diagram voor het tekenen der lijnen van constante helderheid en blauwheid van de hemel.

ook onze nigrometer is nuttig, maar de hoofdzaak is toch, aandachtig om u heen te kijken. Gebruik een spiegeltje, om het een deel van de hemel met het andere te vergelijken (plaat XI). Teken lijnen van constante helderheid en blauwheid in een diagram zoals dat van fig. 137; herhaal dit voor verschillende zonshoogten.

'Langzamerhand ziet het geoefend oog het verloop der isofoten als met blauwe verf op de hemelachtergrond geschilderd.'[2)]

Het donkerste punt ligt altijd in de vertikaal van de Zon, op een afstand van 95° van de Zon als deze laag staat, op een afstand van 65° als ze hoog staat. Door dit punt loopt de *donkerheidslijn*, die de hemel in twee gebieden

1) De schaal van Ostwald is te bestellen bij de 'Meteorologische und Geophysikalische Institute', Frankfurt a.M., voor een paar gulden; die van Linke bij Unesma (zie Met. Zs. **41**, 43, 1924).
2) C. Dorno, Physik der Sonnen- und Himmelsstrahlung, blz. 116.

scheidt: een helderder gebied om de Zon, en een ander helderder gebied daartegenover. De vorm en de grootte dezer gebieden wijzigen zich volgens de zonshoogte. - Deze lichtverdeling kunnen we opvatten als ontstaande uit de samenwerking van drie verschijnselen.

1. De helderheid neemt snel toe dicht bij de zon, ze wordt dan zelfs verblindend groot en de kleur nadert meer en meer tot wit (plaats u in de schaduw van een gebouw dicht bij de schaduwgrens!).
2. Op 90° afstand van de zon vertoont de lucht neiging het donkerst en het blauwst te worden, maar ....
3. Er is nog een ander effekt, waardoor de lichtsterkte toeneemt van 't zenith naar de horizon, terwijl de kleur weer naar wit overgaat, en dat zich met de vorige samenstelt.

Het eerste verschijnsel kunnen we goed meten met de nigrometer. We bedekken de helft van het veld met een aan de achterzijde zwartgeschilderd glaasje dat de hemel vlak bij de zon weerkaatst; de andere helft is dan gericht op 40°-50° van de zon. We veranderen de richting een paar graden in de ene of in de andere zin, - hetgeen vooral voor het eerste der twee velden invloed heeft, - en vinden gemakkelijk een punt waarop er ongeveer gelijkheid is; we besluiten nu, dat de helderheid op dit punt bij de zon wel twintig maal zo groot moet zijn dan op 45° van de zon. - Deze zeer sterke verstrooiing onder kleine hoeken met het invallende licht is te wijten aan grovere deeltjes die in de lucht zweven: stofjes en druppeltjes. Hiermee komt ook overeen, dat de kleur bij de zon minder blauw is, meer wit of zelfs geelachtig zoals de zon zelf; want die grote deeltjes verstrooien ongeveer alle kleuren even sterk.

Het tweede effekt is een gevolg van de verstrooiingswet zelf. Onder 90° moet de verstrooiing bijna tweemaal zwakker zijn dan nabij het tegenpunt van de zon; daarenboven verstrooien de grove deeltjes weinig of niet onder een zo grote hoek, we zien dus alleen het verzadigde, diepe blauw dat de luchtmolekulen zelf verstrooien.

Het derde effekt ontstaat vooral door de grote laagdikte waaronder we de dampkring bij de gezichteinder zien; elk luchtdeeltje verstrooit wel bij voorkeur de violette en blauwe stralen, maar juist deze worden weer het meest verzwakt op hun lange weg van het verstrooiende deeltje tot aan ons oog. Bij een zeer dikke luchtlaag heffen die twee werkingen elkaar net op.

Stel dat een volume-element op afstand *x* van ons oog een breukdeel *sdx* verstrooit; dat licht wordt verzwakt in de verhouding $e^{-sx}$ eer het ons oog bereikt. Van een 'oneindig' dikke laag krijgen we dus de straling

$$\int_0^{\infty} s\, e^{-sx}\, dx = 1$$

, hetgeen zoals men ziet onafhankelijk is van *s*, dus van de kleur. De lucht bij de gezichteinder moet dezelfde helderheid en kleur hebben als een wit scherm dat door de zon verlicht wordt.

Hier kan nog bijkomen, dat de lagen dicht boven de grond meer zwevende stofdeeltjes bevatten, die de lichtverstrooiing sterker maken en de kleur witter, ook wanneer de luchtlaag nog niet als oneindig dik te beschouwen was.

Waar de hemel *het donkerst* is, is hij ook altijd *het blauwst* en is zijn kleur het meest verzadigd. Dit betekent, dat er geen wolken voorkomen waarvan de deeltjes 0,0001 mm of kleiner zijn; want deze zouden plaatselijk de lichtsterkte verhogen en toch de blauwe kleur onveranderd laten.

Ruskin noemt de blauwe hemel als mooiste voorbeeld van een gelijkmatig verlopende kleurgradatie.[1)] Hij geeft de raad, na zonsondergang een stuk van de lucht te bekijken zoals het zich weerspiegelt in een ruit of zoals het omlijst is door bomen en huizen. Tracht u daarbij voor te stellen dat u naar een schilderij kijkt, en bewonder de gelijkmatigheid, de rust, de teerheid van de tintovergang.

## 177. De veranderlijkheid der blauwe hemelkleur.

De tint van de blauwe hemel is van dag tot dag anders, al naar gelang van de mindere of meerdere hoeveelheid stof en

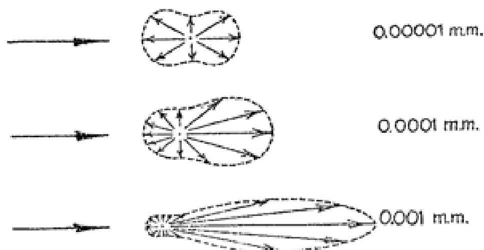



Fig. 138. Verstrooiing van het licht in de verschillende richtingen door korreltjes van toenemende grootte.

waterdruppeltjes die in de lucht zweven. Het gebruik van een cyanometer is voor dergelijke vergelijkingen onontbeerlijk.

Het diepste donkerblauw vertoont de lucht bij tijdelijke opklaringen tussen de regenbuien, in de wiggen van hoge druk. Daarentegen wordt de lucht witachtig, zodra de ijlste cirruswolken verschijnen, of 's zomers door stof (§ 172, 173).

1) Elements of Drawing, **15**, 35.

Vergelijk de blauwheid van de lucht met 'de Italiaanse hemel' gedurende uw vacantiereizen! Vergelijk de blauwheid der lucht in de tropen met die in Nederland!

Vergelijk de blauwheid op verschillende ogenblikken van de dag. Het blauwste is de lucht bij zonsopgang of zonsondergang,[1] hetgeen begrijpelijk is, aangezien een punt bij het zenith dan tegelijk $90^{o}$ van de zon en $90^{o}$ van de gezichteinder verwijderd is (vgl. § 176).

> *Boven alles, o, de hemel zo kalm, zo doorschijnend na de regen, en met wondermooie wolken.*
> *Walt Whitman*: '*Come up from the fields father*.'

> *Kleine deeltjes verstrooien bij voorkeur violet en blauw licht, en wel ongeveer even sterk naar alle richtingen.*
> *Grote deeltjes verstrooien alle kleuren even sterk (wit licht), en wel voornamelijk onder kleine hoeken* (fig. 138).

## 178. Wanneer is de lucht in de verte oranje? Wanneer groen?[2]

Wij hebben gezien, dat bij onbewolkte lucht de hemel aan de kim dezelfde kleur moet vertonen als een blad wit papier, rechtstreeks door de zon beschenen. Het is dus duidelijk dat we tegen

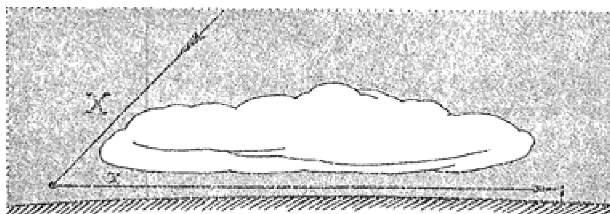



Fig. 139. Als een groot deel van het landschap door een zware wolkenbank bedekt is, kan de gezichteinder een warm-oranje kleur vertonen.

zonsondergang, als de zon alles in een warm oranje gloed kleurt, ook deze zelfde tint overal langs de gezichteinder zullen zien verschijnen.

1) Phys. Rev. **26**, 497, 1908.
2) M. Minnaert, Hemel en Dampkring, **29**, 1, 1931.

Maar er zijn ook gevallen, waarin de verre kim zich lang vóór het ogenblik van de zonsondergang oranje kleurt. Een zware, donkere wolkenbank strekt zich uit over het gehele landschap, en alleen heel in de verte is er een lage strook, bij de gezichteinder, waar de zon schijnt (fig. 139). Dan heeft dit stukje van de hemel een verrassende, warm oranje kleur, waartegen zich de donkerzwarte silhouetten der verre boerenhofsteden aftekenen, en dat

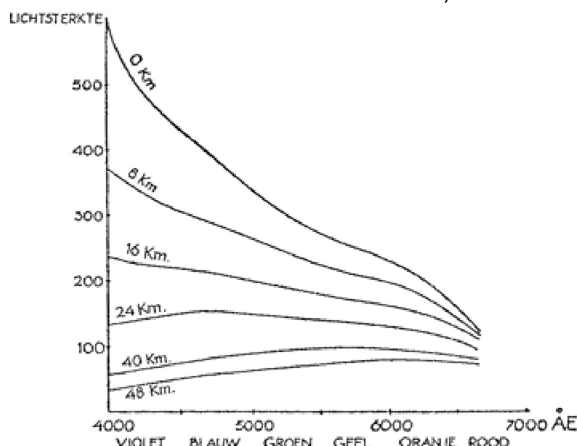



Fig. 140. Samenstelling van het licht, ons toegezonden door een luchtvolumetje op verschillende toenemende afstanden van ons oog.[1)]

zulk een bijzondere indruk maakt omdat al het overige van het landschap donker is.

De verklaring is de volgende. De lucht in de verte (afstand = $x$) wordt bestraald door zonlicht dat een weg X door de dampkring heeft doorlopen; op die weg is een klein breukdeel $s$ per km verstrooid, zodat er nog een lichtsterkte $e^{-sX}$ overblijft. De beschouwde luchtdeeltjes verstrooien naar ons oog een breukdeel van het invallende licht, evenredig met $s$; en dààrvan bereikt weer een breukdeel $e^{-sx}$ ons oog. Tenslotte is wat wij zien evenredig met $se^{-(X+x)s}$. Deze uitdrukking heeft een maximum voor gemiddelde waarden van $s$, maar wordt nul voor kleine en grote waarden.

1) Voor de berekening van deze figuur zijn de verstrooiingscoëfficiënten aangenomen welke voor de dampkring als geheel waargenomen zijn. Feitelijk had men die van de onderste dampkringslaag moeten aannemen.

Anders gezegd: grote golflengten worden niet genoeg verstrooid door de zonbestraalde lucht; kleine golflengten daarentegen worden teveel verzwakt in de loop van de lange luchtweg. Uit de tekening fig. 140 ziet men hoe de kleurensamenstelling is van het licht, dat ons van luchtvolumetjes op 0, 8, 16 .... km afstand (X + *x*) bereikt. Het maximum, de kleur die ons met de grootste sterkte bereikt, verplaatst zich meer en meer van blauw naar rood, naarmate het verlichte deel van de lucht verder van ons verwijderd is. Bij X + *x* = 35 km is de kleur ongeveer groen, bij 45 km al oranje.

We zien hier dus tevens hoe de mooie groene kleur kan ontstaan die een deel van de lucht soms vertoont, bijvoorbeeld na een sneeuwbuit. Uit fig. 140 volgt, dat in die tint het groene bestanddeel slechts weinig overheerst over de andere kleuren, zodat de groene tint weinig verzadigd zal zijn - wat ook met de waarneming overeenstemt.

Die groene en oranje bestanddelen in het licht van de gezichteinder zijn er eigenlijk *altijd*, maar bij onbewolkte lucht mengen ze zich met het blauw der dichterbij gelegen deeltjes, en geven daarmee samen wit. De uitzonderlijke kleureffekten komen te voorschijn, zodra een deel van de lichtweg beschaduwd wordt; wanneer verschillende openingen in het wolkendek voorkomen, zijn zeer verschillende kleurschakeringen mogelijk.

### 179. Kleur van de lucht bij zonsverduisteringen.

Bij *gedeeltelijke zonsverduisteringen* is er gelegenheid op te merken, hoe de kleur van de hemel gewijzigd wordt door de schaduw van de maan, hoe anders ze is aan de zijde van waar de schaduw komt dan aan de zijde naar waar de schaduw beweegt.

Bij *volledige zonsverduisteringen* - (helaas, zó zeldzaam!) - is de kleurenpracht onvergelijkelijk veel groter. Aan de kant van de aankomende schaduw is de hemel donkerpaars, alsof er een onweersbui aan het optrekken was. Tijdens de totaliteit is de lucht in de verte warm oranje gekleurd, omdat wij daar delen van de dampkring zien buiten de totaliteitsgordel, welke nog beschenen worden door de rechtstreekse zonnestraling, en die nu dwars door een onbelicht gedeelte van de dampkring waargenomen worden (vgl. 178).

## 180. Tegenwerpingen tegen de theorie van de blauwe kleur van de hemel.

Het is belangwekkend dat er tot heden toe nog enkele natuuronderzoekers zijn die het vraagstuk van de blauwe lucht als niet helemaal opgelost beschouwen.[1)] De tegenwerpingen zijn van tweeërlei aard; beide zijn ook met onze eenvoudige middelen te controleren.

1. Op zeer zeldzame dagen, misschien nog niet éénmaal 's jaars, is de lucht mooi blauw *tot aan de gezichteinder*. Zulk een waarneming moet zorgvuldig vastgelegd worden aan de hand van normaalkleuren of met een cyanometer. Want dit mocht volgens de verstrooiingstheorie niet voorkomen: bij zò dikke lagen moest de lucht *wit* schijnen (vgl. § 176).
2. In buitengewone omstandigheden ziet men bergen op afstanden van 150 km en meer. Dit zou volgens de verstrooiingstheorie onmogelijk zijn.

Wanneer men echter overweegt dat deze waarnemingen slechts een qualitatief karakter hebben; dat er correcties zijn aan te brengen vóór men er iets uit besluiten mag; dat de theorie op deze ingewikkelde optische verschijnselen slechts in vrij onvolkomen vorm is toegepast, - kan men niet zeer overtuigd zijn van het gewicht dezer tegenwerpingen tegenover de ontzaglijke hoeveelheid proefondervindelijke en theoretische bevestigingen.

## 181. Polarisatie van het licht van de blauwe hemel (vgl. § 182).

Het licht van de blauwe hemel is vrij sterk gepolariseerd. Dit is gemakkelijk waar te nemen met een nicol, maar we kunnen ons ook behelpen met eenvoudiger hulpmiddelen,[2)] bijvoorbeeld een glazen plaatje dat aan de achterzijde donker gemaakt is: als een lichtstraal dit glaasje treft onder een invalshoek van ongeveer $60^{o}$ met de normaal (‘polarisatiehoek’), is het teruggekaatste licht bijna geheel gepolariseerd, en wel zijn het de trillingen *loodrecht op het invalsvlak* die weerspiegeld worden.

We zullen nu onderzoeken hoe de hemel recht boven ons

1) J. Duclaux en R. Gindre, Bull. Obs. Lyon, **11**, 5, 1929.
2) Weldra zullen overal in de handel de polariserende films verkrijgbaar zijn, die men onlangs heeft uitgevonden (‘polaroid’).

hoofd zich in het glaasje weerspiegelt, en we houden het daarbij een 20-tal cm boven ooghoogte, zodat de terugkaatsing ongeveer onder de polarisatiehoek gebeurt (fig. 141*a*). Draai u in deze houding achtereenvolgens naar de verschillende windstreken: terwijl het glaasje altijd *hetzelfde* punt boven uw hoofd weerspiegelt, merkt u op dat het spiegelbeeld *helder* is als u zich naar de zon toe en van de zon af keert, *donker* als u zich dwars op deze richtingen heeft gewend. Daaruit blijkt dus dat het licht van het zenith aan het trillen is loodrecht op het vlak zon - zenith - oog. Dit is inderdaad de algemene regel bij licht dat door heel kleine deeltjes verstrooid wordt.

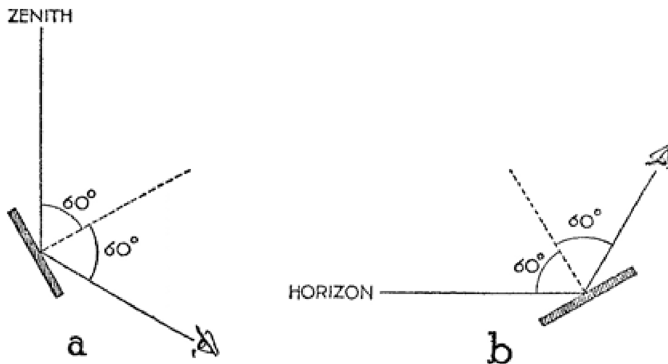



Fig. 141. Onderzoek naar de polarisatie van het hemellicht.
*a*. bij het zenith, *b*. aan de gezichteinder.

Vervolgens onderzoeken we de weerspiegeling van de hemel bij de gezichteinder; steeds houden we ons glaasje zò, dat het licht onder de polarisatiehoek invalt en weerspiegeld wordt (fig. 141*b*). We bevinden, dat het spiegelbeeld helder is aan de kant van de zon en daartegenover, terwijl het donker is in de richtingen dwars daarop. De groter helderheid aan de zijde van de zon is niet verwonderlijk; maar de drie andere hemelstreken zien er voor het oog, zonder spiegelend plaatje, vrijwel even helder uit, en het verschil dat we bij spiegeling waarnemen is dus een echt polarisatieverschijnsel: de hemel aan de kim tegenover de zon zendt ons licht toe dat weinig gepolariseerd is, terwijl dwars op die richting de polarisatie sterk is en de trillingen vertikaal zijn gericht, dus weer loodrecht op het vlak zon - waargenomen punt - oog.

Men kan zich afvragen of de natuur niet soms zelf een dergelijke proef voor ons inricht. Het moet immers voldoende zijn de hemel te zien weerspiegelen in rustig water, om ook daar een

donkerder gebied waar te nemen; we kijken onder een invalshoek van ruim 50° naar het wateroppervlak, en keren ons naar de verschillende hemelstreken: bij lage zon moest het water aan de Noord- en Zuidzijde merkbaar donkerder lijken dan aan de Oost-, of Westzijde. Naar mijn ervaring gelukt deze waarneming soms, maar zelden; meestal is de hemel niet gelijkmatig genoeg van helderheid, of het water niet voldoende effen.

Overtuigender is, dat soms nauw zichtbare wolkjes in de weerspiegeling op het water duidelijker kunnen worden, omdat hun licht niet gepolariseerd is, en dus veel minder verzwakt wordt dan het gepolariseerde hemellicht.[1)] Hetzelfde is natuurlijk nog opvallender als men de hemel en de wolkjes bekijkt door een nicol of met een spiegelend plaatje donker glas. Men kijke liefst bij lage (westelijke- of oostelijke) zon naar een wolkje op 20 tot 40° hoogte, in 't Zuiden of Noorden, waar het hemellicht het sterkst gepolariseerd is; de trillingen geschieden ongeveer loodrecht op de verbindingslijn van dit stuk van de hemel met de zon, dus vertikaal: in een glaasje dat voor ons op een tafel ligt, zien we het licht van dit punt van de hemel dus sterk verzwakt, en het wolkje wordt duidelijker.

Het echte instrument om de polarisatie van de lucht te onderzoeken is de polariskoop van Savart, een eenvoudig en toch uiterst gevoelig toestelletje. Maar aangezien weinig natuurliefhebbers dit bezitten, en de verschijnselen een geheel afzonderlijk gebied der meterologische optica vormen, zullen we slechts naar de litteratuur verwijzen.[2)] Voor belangstellenden die reeksen stelselmatige waarnemingen willen doen is dit onderwerp buitengewoon aardig en veelzijdig.

Met een nicol is de polarisatie van de hemel gemakkelijk waar te nemen, als men hem eenvoudig om zijn as draait. De volgende methode is zeer gevoelig, maar alleen toepasselijk gedurende de schemering.[3)] - Zoek een sterretje, zó zwak dat het net zichtbaar is, bekijk het door de nicol, en let op of de zichtbaarheid van het sterretje in bepaalde standen van de nicol groter is dan in andere. De methode berust op hetzelfde beginsel als onze hoger beschreven waarneming van de wolkjes: de ster is niet

1) Met. Zs. **6**, 1889.
2) Fr. Busch en Chr. Jensen: Tatsachen und Theorieen der atmosphärischen Polarisation (Hamburg, 1911). - Plassmann, Ann. d. Hydr. **40**, 478, 1912, met beschrijving van een quadrant die 75 Mk kost en toelaat alle waarnemingen uit te voeren. - Wetter, **34**, 133, 1917.
3) C.R. **47**, 450, 1858.

gepolariseerd, en wordt duidelijker naarmate ze zich op een donkerder achtergrond aftekent; een verandering der zichtbaarheid verraadt dus een verandering van helderheid van de achtergrond, dus polarisatie.

Het is om dezelfde reden dat de nicol bij dag de zichtbaarheid van verre voorwerpen bevordert, mits men hem zó draait dat hij het verstrooide licht van de lucht tegenhoudt.[1)] Witte zuilen in de verte, vuurtorens, zeemeeuwen enz. worden duidelijker ten opzichte van de achtergrond. Dit lukt echter alleen op *heldere* dagen, want als er mist hangt is het licht van de grijze lucht niet merkbaar gepolariseerd. De invloed von de nicol is gewoonlijk het duidelijkst op 90$^{o}$ van de zon.

> Onderzoek met uw donker glaasje de polarisatie van een aantal punten van de blauwe lucht en tracht een overzicht te krijgen. Zou het gelukken, de gebieden van abnormale polarisatierichting boven de zon en boven haar tegenpunt waar te nemen? En wat is er te bereiken door de blauwe hemel te laten weerspiegelen in een tuinbol, en die weer met ons glaasje onder de polarisatie hoek waar te nemen?

## 182. De bundels van Haidinger.[2)]

Menig laboratoriumphysicus is ongelovig en verbaasd, als we hem vertellen dat we zonder enig hulpmiddel, met het ongewapend oog, kunnen waarnemen dat het licht van de hemel gepolariseerd is! - Enige oefening is daar echter voor nodig. Men bekijkt de weerspiegeling van de hemel in een glazen plaat onder de polarisatiehoek (§ 181), ten einde eerst met volledig gepolariseerd licht te oefenen. Nadat men een minuut of twee het spiegelbeeld der gelijkmatig blauw lucht heeft waargenomen, begint zich een zekere marmering te vertonen. Weldra bemerkt u in de richting waarin u toevallig kijkt het merkwaardige figuurtje dat men 'de bundels van Haidinger' noemt, en dat er ongeveer uitziet zoals fig. 142 aangeeft. Het is een geelachtige pluim, met aan beide zijden een blauw wolkje. De gele pluim blijkt in het invalsvlak gericht te zijn van het licht dat op de glasruit weerspiegeld wordt: *die gele pluim staat dus altijd loodrecht op de richting der lichttrilling*.

Reeds na een paar sekunden is het er niet meer; maar richt uw

1) H.N. Russell, Science, **63**, 616, 1917.
2) Fr. Busch en Chr. Jensen, Tatsachen und Theorien der atmosphärischen Polarisation (Hamburg 1911). - Helmholtz, Physiologische optik, 3e uitgave, blz 2, 256.

de ogen naar een naburig punt van de glazen plaat, dan ziet u het opnieuw![1] Het figuurtje onderscheidt zich maar heel weinig van zijn omgeving, en ik vermoed dat de oefening daarin bestaat, dat men dit zwakke contrast nog leert opmerken te midden van de onvermijdelijke onregelmatigheden van de achtergrond. Men oefent enkele keren per dag, telkens gedurende enige minuten; na een dag of twee onderscheidt men al vrij gemakkelijk de bundels van Haidinger bij het bekijken van de blauwe lucht, die toch slechts gedeeltelijk gepolariseerd licht uitzendt. Bijzonder

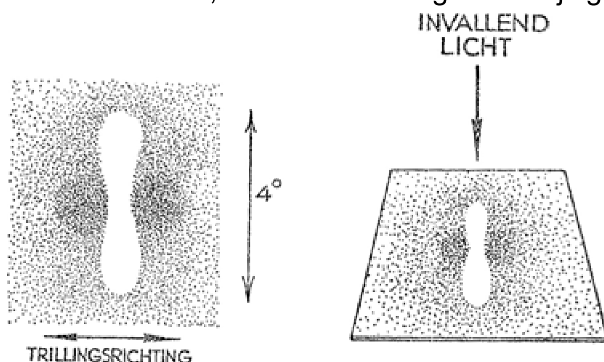



Fig. 142. De bundels van Haidinger: een merkwaardig figuurtje dat men aan de blauwe lucht kan zien, en dat de polarisatie aanwijst (de lichte pluim is geelachtig, de zijdelingse wolkjes zijn blauw.

duidelijk zie ik ze in de schemering, als ik naar het zenith staar: de gehele lucht is als het ware met een netwerk bedekt, en overal waar ik de blik naar richt, zie ik de kenmerkende figuur. Het is een echt genot, aldus zonder instrument de polarisatierichting te kunnen bepalen, en zelfs een schatting van de sterkte der polarisatie te verkrijgen. Meest altijd vindt men dat *de gele pluim naar de Zon* wijst, als men ze als boog van een grote cirkel verlengt; het verstrooide licht trilt dus in 't algemeen loodrecht op het vlak zon - luchtdeeltje - oog.

Duidelijker nog worden de bundels van Haidinger, als men de hemel in een tuinbol weerspiegeld ziet, terwijl men het beeld van de Zon met het hoofd bedekt (vgl. § 11).

In die omstandigheden bemerkt men ook in de nabijheid van

1) Heeft men een nicol tot zijn beschikking, dan bekijkt men daardoor een witte wolk of een gelijkmatig belicht wit vlak, draait de nicol, en tracht het figuurtje van Haidinger daaraan te herkennen dat het meedraait.

de zon een klein gebied waarin de gele pluim niet naar de zon wijst, maar dwars daarop gericht is; de grens tussen het normale en het afwijkende gebied is als een soort schaduw te zien.

De bundels van Haidinger ontstaan, doordat de gele vlek van ons netvlies dichroïtisch is. Dat niet alle waarnemers de kenmerkende figuur op dezelfde wijze schijnen te zien, hangt ongetwijfeld samen met verschillen in de vorm en de bouw dezer gele vlek. Zo zijn er, die het blauwe gedeelte der figuur niet te zien kunnen krijgen.[1)] Soms ziet men het gele gebied samenhangend, soms het

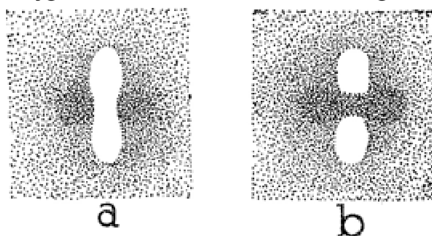



Fig. 143. We zien de bundels van Haidinger niet altijd op dezelfde wijze: bij *a.* loopt het geel door, bij *b.* het blauw.

blauwe (fig. 143); twee beweringen staan hier tegenover elkaar:

A. De eerste indruk die men krijgt zou zijn dat het geel doorloopt; als het oog vermoeid wordt door te lang turen, verandert het beeld en ziet men het blauw doorlopen.[2)]

B. De kleur die doorloopt is altijd die welke loodrecht op de verbindingslijn der ogen staan. Kijkt men dus naar eenzelfde punt van de blauwe hemel, en draait men het hoofd 90$^{\circ}$, dan ziet men eerst de ene, dan de andere kleur doorlopen.[3)] Bij de vluchtigheid van het figuurtje is het niet gemakkelijk zich daarover een eigen oordeel te vormen.

De bundels van Haidinger zijn veel duidelijker te zien met een groen of blauw glaasje voor het oog, terwijl ze met een rood of geel glaasje verdwijnen.[4)]

> *'Soms, alleen blijvend in de zitkamer, laat ik onwillekeurig het boek rusten en kijk door de open balkondeur naar de sierlijk neerhangende takken der hooge berken, waarover reeds de schaduw van de avond neerdaalt, en naar de heldere hemel, die, als je aandachtig blijft kijken, ineens een soort geelachtig wazig vlekje vertoont dat daarna weer verdwijnt.'*
> *L.N. Tolstoi, Kindsheid, blz.* 360.

1) Busch - Jensen, t.a.p. blz. 22.
2) Haidinger, Ann. d. Phys. **67**, 435, 1846.
3) Brewster, Ann. d. Phys. **107**, 346, 1859. Blijkbaar hiermee in overeenstemming: A. Hofmann, Wetter, **34**, 133, 1917.
4) Stokes, Papers, **5**.

## 183. Verstrooiing van het licht door nevel en mist.

Lichte morgennevel waar de zonneschijn in doordringt is heerlijk opwekkend en brengt een dichterlijke atmosfeer in het eenvoudigste landschap. Dichtere mist belemmert het uitzicht in de verte, maar geeft aan de dichtbije bomen en huizen een wazigheid die we gewoon zijn alleen bij voorwerpen in de verte waar te nemen; tegelijk treft ons dan de grote gezichtshoek waaronder zij ons verschijnen, waaruit we weer de indruk krijgen, dat die bomen en huizen wel zeer hoog zijn. Door deze combinatie van indrukken, die meestal niet eens tot bewustheid komt, geeft de mist aan de grote gebouwen de statigheid van reeksen paleizen, en verheft de toppen der torens tot in wolkenhoogte.[1)]

Meestal zijn de voorwerpen die men door de mist ziet niet van kleur veranderd. De zon is veel minder helder geworden, maar nog altijd wit; de verre straatlantarens hebben geen merkbaar andere kleur dan de dichtbijzijnde. - Toch komen er ook andere gevallen voor; men ziet soms de zon, op aanzienlijke hoogte boven de gezichteinder, *rood* door de mist schijnen. Alles hangt natuurlijk van de grootte der mistdruppeltjes af: men ziet de lichtbron roodachtig, zodra de druppeltjes zo klein worden dat ze naderen tot de golflengte van 't licht, en dan bij voorkeur de blauwe en violette stralen verstrooien, terwijl de gele en rode meer ongehinderd doorgaan (§ 171).

*'t Smoort, het smuikt, het smokkelwedert*

*Hier en daar een plekke boenend,*
*Zit de zonne in 't duister veld;*
*rood, gelijk een oud versleten*
*stuk ongangbaar kopergeld.*
*G. Gezelle, Fiat Lux.*

In zulke gevallen is de mist zelf wit, zeer bepaald veel witter dan de vaal-oranje zon: want hij wordt zowel verlicht door de verstrooide als door de doorgelaten stralen. Blauwachtig is zulk een zware mist niet, omdat het verstrooide licht misschien 99% van het invallende licht bedraagt, en dus in zijn geheel vrijwel wit moet zijn, ook al verstrooit elk volumeelementje bij voorkeur blauw.

Betrekkelijk grote druppeltjes, zoals die waaruit de mist bestaat, verstrooien het meeste licht naar voren, onder geringe

1) Vaughan Cornish, Geogr. Journ. **67**, 506, 1926.

hoeken met de oorspronkelijke invalsrichting (§ 177). - Vandaar dat een lichte nevel zoveel duidelijker zichtbaar is in richtingen in de omgeving der zon. De prachtige foto's van zonnige nevel in het bos zijn tegenlichtopnamen, waarbij de camera niet ver van de zon gericht was.

Bij wat zwaardere mist is het meest opvallende: '*het lichamelijk worden*' der schaduwen (fig. 144). Als u nadert tot een boom, wiens stam door de zon beschenen wordt, ziet u uit de richtingen AW, BW zeer veel licht komen, omdat daar een aantal verstrooiende mistdruppeltjes zijn die de lucht als 't ware zelf-lichtgevend




Fig. 144. Het ontstaan van schaduwen achter een voorwerp in de mist.

maken. In de richting CW kijkt u door onbelichte lucht en ziet dus veel minder licht. Gaat u nu met het oog een weinig opzij tot in W', dan schuiven lichte en donkere delen van de mist over elkaar, de schaduw wordt onduidelijk; daarenboven zien we dan bijna geen licht uit de richtingen AW', BW' naar ons oog komen, omdat de verstrooiing onder deze vrij grote hoeken al niet merkbaar meer is (§ 177).

Zo hangt een schaduw in de ruimte achter elke tak, achter elke paal; en van die schaduwen merkt u niets, tot u zich vlak achter hen bevindt. Nog merkwaardiger is het schouwspel bij avond, als elke straatlantaren, elke automobiellamp de mist aan het lichten brengen en schaduwstrepen werpen achter elk voorwerp, die men echter alleen van de achterzijde ziet. Een wandeling door de mist is een waar optisch genot!

Soms kunt u de schaduwstrepen al zien van uit de *dwarse* richting: 's ochtends, in de lente, als de zonnestralen schuin over de daken der huizen vallen, en onze blik ongeveer langs de schaduwgrens gericht is, die zich zwakjes in de lucht aftekent.

Veel moeilijker waar te nemen is de *terugverstrooiing* door de mist. Hij moet uit fijne druppeltjes bestaan en toch dicht zijn; een felle lichtbron achter ons, een donkere achtergrond vóór

ons. Soms is het voldoende 's avonds bij mist het raam te openen en een sterke lamp achter zich te hebben, om onze schaduw op de mist geprojecteerd te zien.[1) ] Merk op: de schaduw valt niet op de grond; want zij is er nog, ook al staat de lamp iets lager dan uw hoofd. Laat uw ogen even wennen aan de duisternis buiten, bescherm ze met uw handen tegen zijdelings licht (fig. 145). De schaduw van uw armen op de mist is zeer verlengd, die van uw lichaam schijnt kegelvormig en reusachtig; alle schaduwstrepen convergeren naar de schaduw van uw oog, die tevens het tegenpunt van de lamp is. Om dit punt is een grote lichtschijn,

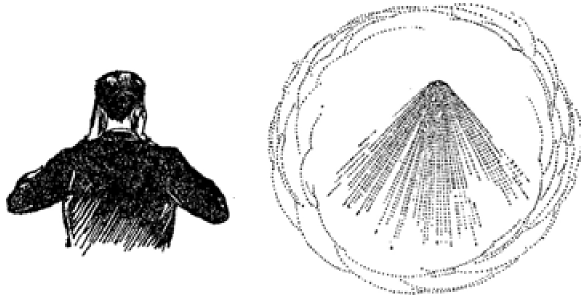


Fig. 145. ‘Het Spook van de Brocken’ op Hollandse mist!

die vooral duidelijk tot bewustzijn komt als u zich iets heen en weer beweegt. Het hele wonderlijke tafereel is niets anders dan wat men ‘het spook van de Brocken’ genoemd heeft, en dat bij mist en zon op die hoge bergtop zulk een grote indruk maakt. - Een fietser ziet soms even zijn schaduw op de mist, reusachtig vergroot, als een automobilist hem achterop rijdt en met zijn felle koplampen beschijnt; het is zelfs voldoende dat een tweede fietser zijn lantaren op het hoofd van den eersten richt, opdat deze het verschijnsel al zou waarnemen. - De lichtschijn en de daarin zich aftekenende schaduwen ontstaan, doordat de mistdruppeltjes een klein gedeelte van het licht terugverstrooien; al de bundels die naar de schaduw van ons oog schijnen te *convergeren*, zijn in werkelijkheid *evenwijdig* (of bijna evenwijdig) (vgl. § 191 en 217).

## 184. Zichtbaarheid van regen- en waterdruppels.

Het is de moeite waard, bij een regenbui eens om ons heen te kijken, en op te merken in welke richtingen we de regen het

1) F. Richarz, Met. Zs. **25**, 19, 1908.

duidelijkst zien vallen. Tegen de heldere hemel als achtergrond ziet men de druppels niet, noch tegen de grond, maar wel tegen huizen en bomen. Blijkbaar worden de druppels pas zichtbaar doordat ze het licht van zijn baan doen afwijken, licht brengen waar men duisternis zag; en blijkbaar doet een druppel de lichtstralen in hoofdzaak *over vrij kleine hoeken* afwijken, bv. tussen

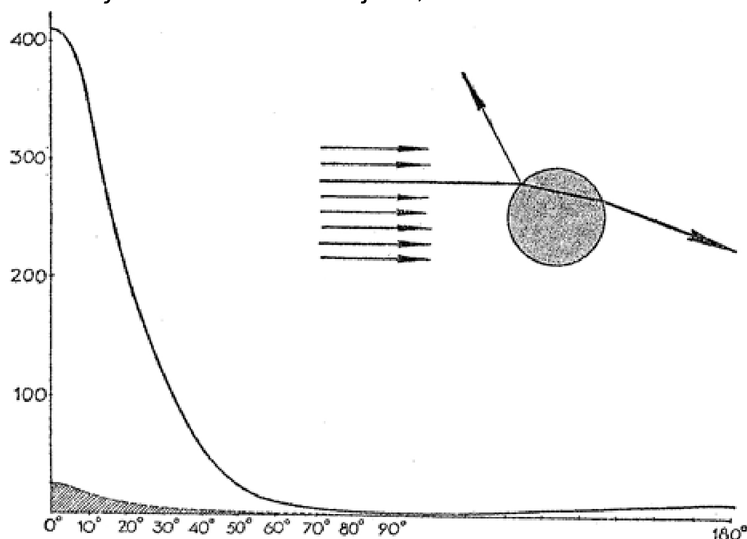



Fig. 146. Zonlicht, dat fonkelt in regendruppels, wordt in allerlei richtingen teruggekaatst en gebroken. De verdeling van het licht over de verschillende afwijkingshoeken. (Gestippeld: het aandeel der teruggekaatste stralen)

$0^o$ en $45^o$. Hoe groter de verandering in de lichtsterkte van de achtergrond voor een klein richtingsverschil, des te duidelijker de druppels. Als de zon schijnt terwijl het regent, zien we bijzonder duidelijk hoe de druppels in de omgeving van de zon helder fonkelen: de zon is zòveel helderder dan de hemelachtergrond, dat elke druppel die de stralen breekt hier opvalt.

Merk op dat men bijna altijd de druppels als heldere parels tegen een donkere achtergrond ziet, en zelden donker tegen heldere lucht. Dat is een toepassing van het algemene beginsel, dat het oog getroffen wordt door *verhoudingen* van lichtsterkten, niet door *verschillen* (§ 64). Doet de druppel van het licht 100 een deel 10 afwijken, dan is dat zeer sterk vergeleken met een

donkere achtergrond van bv. 5 lichteenheden; terwijl de vermindering van 100 tot 90 ternauwernood opvalt. - Toch kunnen we dikke druppels vlak bij ons als donkere dingetjes zien vallen, bv. van onze paraplu; of bij een zware bui zien we een zwarte arcering tegen de achtergrond van een heldere scheur tussen sombere regenwolken.

Dezelfde verschijnselen kan men waarnemen aan fonteinen, aan de druppelregen van een sproeimolentje in de tuin.

Door toepassing van de gewone optische wetten kan men gemakkelijk berekenen welk aandeel de aan het oppervlak teruggekaatste stralen en de door de druppel gedrongen, gebroken stralen aan de lichtverdeling van het tafereel hebben (fig. 146). Het blijkt, dat deze laatste verreweg de hoofdrol spelen, en dat ze inderdaad het licht slechts over tamelijk kleine hoeken doen afwijken, zoals wij al uit de rechtstreekse waarneming hadden besloten.[1)]

## 185. Zichtbaarheid van deeltjes die in de lucht zweven.

Voor al wat in de lucht zweeft geldt ongeveer hetzelfde als wij voor de waterdruppels hebben beschreven. Stofwolken zijn veel beter zichtbaar naar de zon toe dan van de zon af. Als er een horizontale laag van heiigheid over het landschap ligt, ziet men dit helderheidsverschil zeer duidelijk, op het ogenblik dat men bij het bestijgen van een berg of bij een ballontocht de bovengrens van de laag bereikt; op ongeveer 80° van de zon ligt het overgangspunt, waar de laag ongeveer dezelfde helderheid heeft als de hemel.[2)]

Bij lichte mist plaatse men zich in de schaduw van een schoorsteen: de zon is omringd door een heldere aureool van licht, die men niet opmerkte zolang men door het felle zonlicht verblind werd; soms is die aureool rood omzoomd. Ook als er geen mist is, is een dergelijke zij het ook zwakkere lichtschijn om de zon zichtbaar, veroorzaakt door stof en waterdruppeltjes (§ 197).

Insekten die in de lucht zwermen ziet men als zwevende lichtvonken aan de zijde van de zon, terwijl ze in tegenovergestelde richting haast onzichtbaar zijn. - De baarden der roggearen, die hoog in de lucht opsteken, schitteren in prachtig purpergoud wanneer ze belicht worden door de lage avondzon, en men in

1) Uitvoerige berekening bij Chr. Wiener, Nov. Act. Leop. **73**, 106, 1900.
2) Met. Zs. **31**, 257, 1914.

de richting naar haar toe waarneemt. - Droge bladeren, stenen, takken schitteren overal als men naar de zon kijkt, weinig of niet in de tegenovergestelde richting.

Inderdaad wordt het licht aan de grenzen van een scherm slechts onder kleine hoeken afgebogen. Hetzelfde geldt voor terugkaatsing, breking of buiging door bolletjes, zolang die niet al te klein zijn (§ 177, 184). Onregelmatige voorwerpen kunnen enigszins door schermpjes of bolletjes benaderd worden.

## 186. Zoeklichten.[1]

Aan de bundel van een zoeklicht in de nacht zijn er verschillende belangwekkende waarnemingen te doen. Vooreerst moeten we bedenken dat de bundel onzichtbaar zou zijn, was het niet

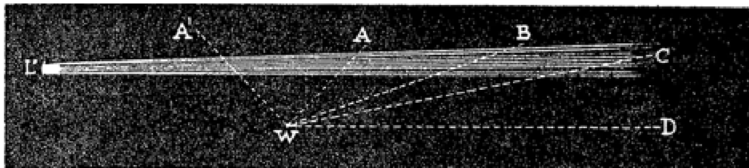



Fig. 147. Het spoor van een zoeklichtbundel schijnt in een zeer bepaalde richting plotseling te eindigen. De verklaring wordt door de figuur gegeven.

door de stofjes en druppeltjes die in de lucht zweven en die door hem verlicht worden. De helderheid van de bundel geeft ons dus aanwijzingen omtrent de zuiverheid van de lucht.

Het lijkt verwonderlijk dat we de bundel zo plotseling zien eindigen, zelfs wanneer de lucht heel helder is, en er nergens een wolkenlaag hangt die als ‘scherm’ kan dienen. Verklaring: de waarnemer W ziet licht komen uit de richting AW, uit BW, uit CW, en van alle verder punten van de bundel; maar hoe ver die bundel zich ook moge uitstrekken, geen zijner punten zien we in een richting verder dan de richting DW, evenwijdig aan LC. Deze richting, waarin we hem zien ‘eindigen’ geeft dus nauwkeurig aan hoe de bundel in de ruimte gericht is. Dat er nog zoveel licht komt van zulke verafgelegen delen van de bundel is te verklaren, doordat de gezichtsstraal daar zo schuin door de bundel dringt, en dus door een zo dikke laag lichtverstrooiende

1) M. Minnaert, Hemel en Dampkring, **29**, 89, 1931.

stof heen kijkt; terwijl hij in de richting AW slechts een vrij korte weg door de verlichte lucht aflegt.

Stel u dicht bij de bundel en vergelijk de lichtsterkte onder een hoek van $45^o$ en van $135^o$: de voorwaartse verstrooiing volgens A'W is veel sterker dan de terugwaartse verstrooiing AW. Toch zien we in beide gevallen dezelfde hoeveelheid lichtverstrooiende stof in de gezichtslijn, en de middellijn van de bundel is waarschijnlijk zo weinig anders in A dan in A' dat dit geen rol speelt. De verklaring is natuurlijk te zoeken in de asymmetrische verstrooiing der stofjes, die vrij groot zijn en dus vooral naar voren verstrooien (§ 177). De proef is nog zuiverder als men zich bij een vuurtoren bevindt, en dan twee bundels vergelijkt, op 't ogenblik waarop de ene schuin van ons af, de andere schuin naar ons toe loopt.

Enkele dezer waarnemingen kunnen al geschieden aan de bundel van een *goede* elektrische zaklantaren, mits de nachtelijke omgeving goed donker is. Met zulk een lantaren kan men aan anderen een bepaalde ster aanwijzen, zo duidelijk is ‘het uiteinde’ bepaald![1)]

## 187. Het zicht.[2)]

Waar men een vrij uitzicht heeft, kan men een reeks goed kenbare punten kiezen op toenemende afstanden, bv. fabriekschoorstenen of kerktorens van verre dorpjes, waarvan de afstand op een goede kaart af te lezen is. Nu bepaalt men dagelijks welk punt nog net zichtbaar is, en noemt de afstand daarvan: ‘het zicht’. Is het aantal beschikbare punten te klein, dan schat men het zicht naar de algemene indruk in een schaal van 0 tot 10. Deze grootheid is natuurlijk een uiterst ingewikkeld samenstel van allerlei faktoren, inzonderheid van de waterdruppeltjes en stofdeeltjes in de lucht, die vals licht verspreiden over de donkere partijen. Stel, het voorwerp kaatst een lichthoeveelheid A terug; de lucht ervóór B; de lucht erachter C; stel nog, dat van deze lichthoeveelheden, na verzwakking op de af te leggen lichtweg, hoeveelheden *a, b, c* ons oog bereiken. Dan is de zichtbaarheid van het verre voorwerp bepaald door a+b / b+c, en deze breuk is

1) Davis, Science, **76**, 274, 1932.
2) J. Aitken, Proc. R. Soc. Edinburgh, **20**, 76, 1883. Quart. Journ. **23**, 20, 1897. - Das Wetter, **24**, 252, 1907. - Ann. Hydr. **44**, 1916. - Met. Zs. **38**, 78, 19 en **42**, 422, 192. - F.J.W. Whipple, Quart. Journ. **48**, 85, 1922. - M.G. Bennett, Quart. Journ. **56**, 1, 1930. - Naturwiss. **23**, 253, 1935. En talloze anderen!

het ook waarvan 'het zicht' afhangt. Vandaar dat het zicht niet alleen door de toestand van de dampkring gegeven is, maar dat het ook enigszins afhangt van de stand van de zon. Om deze invloed tot een minimum te herleiden, heeft men afgesproken als kenbare punten liefst donkere voorwerpen te kiezen, ongeveer 3 meter hoog, die gezien worden onder een hoek van ten hoogste $1^o$. Het is zelden dat men geheel aan die eisen zal kunnen voldoen, maar zelfs dan is het zicht eigenlijk alleen goed vergelijkbaar voor voorwerpen in een zelfde hemelrichting.

's Nachts kiest men bepaalde lantarens op bekende afstand; of men bepaalt op hoeveel graden boven de gezichteinder een ster van de 1e grootte zichtbaar wordt. Deze bepalingen zullen natuurlijk niet geheel overeenstemmen met de bepalingen bij dag: de gemeten grootheid is eigenlijk een andere.

Talloze waarnemers hebben zichtwaarnemingen uitgevoerd, en hun resultaten statistisch verwerkt. De hoofdfaktor die het zicht bepaalt is wel de hoeveelheid stof die de wind meevoert; om de stofkernen slaat waterdamp neer, en de aldus gevormde druppeltjes verstrooien het licht. Daardoor is het begrijpelijk, dat naast het stofgehalte ook de vochtigheidsgraad van de lucht een grote invloed zal hebben: hoe vochtiger de lucht, hoe minder zicht. Stofvrije lucht en goed zicht krijgen we na een regenbui; of als een gebied van hoge druk net aankomt (dalende luchtstroom!); of in de smalle wigvormige maxima die men soms op de weerkaartjes tussen twee depressies ziet. Dat het zicht dikwijls goed is kort voor de regen, is best te begrijpen, als men bedenkt dat de wind veelal van een naburig regengebied naar ons toe waait en ons gezuiverde, stofvrije lucht brengt.

Aan onze kust brengt de zeewind zuivere lucht aan; de landwind, lucht die over dicht bevolkte streken is gegaan. Het is dus begrijpelijk dat daar de Westenwind helderder zicht zal meebrengen dan de Oostwind; die vergelijking moet echter wel *bij gelijke vochtigheidsgraad* gebeuren, dus bv. bij ongeveer gelijke verschillen tussen droge en natte thermometer.

- In een plaatsje in Schotland was het zicht wel 6 tot 9 maal zo groot als de wind van uit de bergen blies dan als hij over een sterk bevolkte streek was gegaan. De invloed van de vochtigheid blijkt daaruit, dat het zicht ongeveer 4 maal zo groot was bij een psychrometerverschil van $8^o$ dan van $2^o$. Zeer aanschouwelijk wordt de voorstelling, als men op de kaart lijnen uitzet in de richting van waar de wind komt, en hun lengten geeft die evenredig met de zichtafstand zijn; dit doet men voor enige verschil-

lende waarden van de vochtigheidsgraad, en vindt aldus een schaar krommen, die de gemiddelde doorzichtigheid der lucht van verschillende oorsprong aangeven. - Bij stakingen is het zicht ineens veel beter!

Verder geeft de statistiek, dat het zicht beter is bij krachtige wind; en beter in de zomer (Maart-October) dan in de winter. Het dagelijks verloop schijnt te rangschikken in een der volgende kategorieën:

's middags een minimum, 's ochtends en 's avonds groter .... convectietype;
afnemend in de loop van de dag .... naderend barometrisch minimum;
toenemend in de loop van de dag .... naderend barometrisch maximum;
onregelmatig schommelend.... randstoringen van golvende isobaren om een depressie.

Het is merkwaardig, hoeveel minder ver men ziet in een wolk of in een mistbank, dan in de regenbui waarin ze zich oplossen. En inderdaad, noem V het watervolume in de eenheid van luchtvolume; en verdeel V in druppels met middellijn *d*, dus met een volume van ongeveer $d^3$. Er komen V / $d^3$ druppels; iedere druppel schermt een oppervlak van ongeveer $d^2$ af, tezamen

$$\frac{Vd^2}{d^3} = \frac{V}{d}$$

. Hoe kleiner dus de druppels, hoe minder doorzichtig.[1] Bij zware mist is V van de orde $10^{-6}$, en bij stortregen merkwaardigerwijze ongeveer even groot; de druppeltjes mist hebben echter een middellijn van de orde 0,001 cm, de regendruppels 0,05 cm! Beschouw nu een zuil met doorsnee 1 $cm^2$ en lengte *l*; de druppels in die zuil zullen ongeveer de helft van het licht tegenhouden, indien Vl / d = 0,5. Voor mist wordt dus *l* = 5 m; voor regen, 100 m. Dit is de goede orde van grootte;[2] de geweldige invloed der fijne of grove verdeling is uit dit voorbeeld duidelijk te zien. Er zijn echter gevallen waarin het zicht gedurende een stortregen aanmerkelijk kleiner wordt: nl. als de druppels bij het treffen van de grond in fijne verdeling opspatten, en we op geringe hoogte boven de grond kijken. Wat weer klopt met onze redeneringen.

1) Dit gaat echter niet meer door, als *d* kleiner wordt dan de golflengte van 't licht; dit buigt dan om de druppeltjes heen.
2) Men kan gemakkelijk de redenering nauwkeuriger maken; vgl. § 54.

## 188. Het 'watertrekken' der zon.

*En zo gingen die twee in de richting der zinkende zonne,*
*Die zich diep achter wolken verborg en dreigde met onweer;*
*Dringend nu hier, dan daar, door de sluier, met gloeiende blikken,*
*Wierp zij over het landschap haar onheilspellende bundels.*
*Goethe, Hermann und Dorothea, VIII*, 1.

In de frisse herfstmorgen straalt de zon, en dringt overal door de openingen van het gebladerte der bomen. Van op afstand zien we hoe de stralenbundels zich mooi evenwijdig in de nevelige lucht aftekenen. Maar komen we dichterbij, dan is het alsof diezelfde lichtbundels niet meer evenwijdig waren, en schijnen zij van één enkel punt uit te stralen: van de zon.

Een dergelijk verschijnsel kennen we nu ook op grote schaal. Als de zon verborgen is achter zware, losse wolken, en de lucht vervuld is van fijne nevel, ziet men dikwijls groepen lichtbundels van de zon uitschieten, hier en daar door de openingen tussen de wolken dringen, en hun weg aftekenen in de nevel, dank zij de verstrooiing door de neveldruppeltjes. Al deze stralen zijn in werkelijkheid *evenwijdig* (hun verlengingen gaan wel door de zon, maar die is zover weg dat ik wel van 'evenwijdig' spreken mag). Door het perspektief echter lijken ze ons van één punt uit te gaan, hun 'vluchtpunt' is de zon; net zoals de spoorrails die in de verte naar elkaar toe schijnen te lopen (Plaat XIV*a*).

Naarmate de wolken verschuiven, ziet men sommige lichtbundels sterker of zwakker worden, zich verplaatsen, enz. Soms is het wijde landschap overal met zulke bundels gevuld; andere malen is het één enkele wolk die de zon verbergt en een schaduw werpt.

Ook de maan kan dergelijke lichtbundels doen ontstaan[1)]; maar bij die geringe lichtsterkte zijn de bundels alleen zichtbaar wanneer de dampkring sterk verstrooit. Dit zeer zeldzame verschijnsel maakt een onheilspellende, sombere indruk.

Waarom spreekt het volk in Duitsland van 'watertrekken'? Stelt men zich voor, dat het water langs die bundels als langs kanalen naar de zon gezogen wordt? In Nederland zegt men wel: 'de Zon staat op poten', wanneer ze vrij hoog staat en de lichtbundels nogal steil naar beneden lopen. De Engelsen hebben de uitdrukking: 'Jacobsladder of Engelenladders'.

Waarom ziet men de stralenbundels slechts onder tamelijk kleine afstanden van de zon, en zelden tot 90$^{o}$ afstand bv.? - (vgl. § 177, 183, 184).

1) Met. Zs. **7**, 1890.

## 189. De schemeringskleuren.[1)]

*Toen 't eerste gele uchtend-rood*
*blonk boven wei en water.*

*J. Reddingius, Johanneskind.*

De gewone man wil een zonsondergang gestoffeerd zien met purperen en gouden wolken, inwendig gloeiend met een diepe, warme kleur; hij wil er met kinderlijke voldoening een leeuw of een kameel in raden, een vlammend paleis en een fantastische vuurzee. De natuurkundige daarentegen tracht zijn waarnemingen te beginnen met het eenvoudigste geval: hij verkiest een geheel onbewolkte, heldere lucht. Hij onderzoekt fijne kleurschakeringen, onvatbaar tere tinten, overgangen tussen het blauw van de dag en de diepe donkerte van de nacht, die slechts met enige oefening zichtbaar worden, maar die altijd ongeveer in dezelfde opeenvolging terugkeren, en waarvan de ontwikkeling een groots natuurdrama vormt: het drama van de scheidende zon.

Waarom maken deze lichtverschijnselen zulk een indruk van oneindige avondvrede? Vergelijk ze met de regenboog, die opwekt en vreugde brengt. Hun stemming hangt blijkbaar samen met de zeer brede, in elkaar vloeiende kleurenbogen, met hun bijna horizontale gelaagdheid. Overal, in de bouwkunde van het landschap, brengt de horizontale lijn rust en bevrediging.

De aandachtige waarneming der schemeringskleuren kan ons inlichten omtrent de toestand van de hoogste dampkringslagen, ver boven de gebieden waar zich de wolken vormen; lagen, waarvan we bijna niets anders te weten komen dan wat de lichtverstrooiing ons leert. - October en November zijn de beste maanden om deze studie te beginnen. De duidelijkheid der verschijnselen is zeer wisselend; stof, heiigheid en vooral de rook van onze steden ontnemen hun de kleurenpracht. Men kijke dus herhaaldelijk! Om de fijne schemeringskleuren goed te zien, moet het oog voldoende uitgerust zijn; kijkt men ook nòg zo vluchtig naar de zon vóór haar ondergang, dan is men vooreerst te zeer verblind om het verdere verloop der schemering goed te kunnen waarnemen. Wie de oostelijke kant van de hemel wil bestuderen,

1) Uitgebreide litteratuur, o.a. samengevat in Pernter-Exner en in: P. Gruner en H. Kleinert, die Dämmerungserscheinungen (Hamburg, Grand, 1917). - Een zeer persoonlijk, prachtig boekje is: A. Heim, Luftfarben (Zürich, Hofer, 1912). - Een klassieke beschrijving van de schemering in onze gewesten, bij von Bezold, Ann. d. Phys. **123**, 240, 1864. - Zie nog: P. Gruner, Met. Zs. **34**, 415, 1917.

mag niet teveel naar de zeer heldere westzijde kijken. Telkenmale dat men het oog laat uitrusten door even binneshuis te gaan, of een blik in een boek te werpen, zal men bemerken dat de schemeringsverschijnselen veel kleurrijker geworden zijn en zich verder uitstrekken dan men eerst dacht. Mijn raad is dus: begin eerst zonder teveel voorzorgen het algemene verloop der schemering na te gaan, en onderzoek daarna de bijzondere schoonheid van elk deel van de hemel.

Vergelijk dikwijls verschillende delen van de hemel met elkander, met behulp van een spiegeltje, dat u op armafstand voor u houdt: op het deel van de hemel, naar hetwelk u kijkt, projekteert u aldus een stukje uit een geheel andere richting.

Misschien zal het u moeilijk schijnen, iets van een *vorm* te zien in kleurverschijnselen die geheel en al vloeiend in elkaar overgaan. Het geheim is zeer eenvoudig: trek in gedachte aan de hemel *lijnen van gelijke helderheid of van gelijke tint*; die zijn het waarover in de beschrijvingen telkens gesproken wordt. Zo komt men er bijvoorbeeld toe, te zeggen dat de schemeringsverschijnselen zich in 't algemeen als gekleurde bogen ontwikkelen.

.... *rijst in het Oosten het daglicht omhoog,*
*paalloos wassende zegeboog.*

*C. Verschaeve, Zeesymphonieën, I*, 1.

Hier volgt nu de beschrijving van een typische zonsondergang in onze gewesten bij heldere hemel (fig. 148). Als de zonshoogte negatief opgegeven is, bedoelen we hoe diep ze beneden de gezichteinder zou staan indien men ze nog zien kon.

*Zonshoogte* 5°; *een half uur voor zonsondergang.*

De hemel krijgt nabij de gezichteinder een warmgele of geelrode rand, geheel anders van kleur dan het gewone witachtige blauw dat wij daar in de dag zien. Boven de zon worden *de horizontale strepen* zwak zichtbaar, als een langwerpige, geelachtige kleurenband (door ‘strepen’ wordt alleen bedoeld, dat de lijnen van gelijke tint horizontaal lopen; niet, dat er scherpe grenzen zouden zijn). Daarboven, concentrisch om de zon, een grote, zeer heldere witachtige lichtvlek: *de heldere lichtschijn*, dikwijls omzoomd door een zwak aangeduide *bruine ring*.

Als er witte wolken bij de oostelijke horizon zijn, kleuren ze zich in zachtrode gloed; daarboven vertoont de hemel *de bovenste tegenschemering*: een gekleurde zoom van 6°-12° hoog, met de overgang naar oranje, geel, groen, blauw.

*Zonshoogte* 0$^{o}$; *Zonsondergang*. Nu beginnen de schemeringsverschijnselen eigenlijk pas!

In 't Westen. - Langs de gezichteinder ligt de kleurenbank der horizontale strepen, van beneden naar boven witgeel, geel, groen gekleurd. Daarboven praalt de heldere lichtschijn, transparant wit, omzoomd door de bruine ring; hij bereikt een hoogte van wel 50$^{o}$.

In 't Oosten. - Bijna tegelijk met de zonsondergang begint zich *de aardschaduw* te verheffen; het is een zeer opvallend, blauwgrauw ‘segment’, dat geleidelijk over de purperen laag schuift, en meestal slechts tot een hoogte van een zestal graden boven de gezichteinder te volgen is. Soms zou men al lang vóór zonsondergang menen, dat men iets van die aardschaduw ziet, maar dat is eenvoudig een laag stof of neveligheid. Boven die aardschaduw, de kleurenzoom van de tegenschemering in volle pracht. Hoger: *de heldere weerschijn* van het westelijke licht, een uitgestrekte, diffuse verlichting.

*Zonshoogte* -1$^{o}$ *tot* -2$^{o}$; 10 *minuten na zonsondergang*.

In 't Westen. - De horizontale strepen worden (van beneden naar boven) bruin, oranje, geel. De heldere lichtschijn met zijn bruine ring bereikt nog 40$^{o}$ hoogte.

In 't Oosten. - De aardschaduw stijgt al hoger; in de aardschaduw hebben alle dingen een doffe, éénkleurige tint gekregen, min of meer groenblauw (subjektieve kontrastkleur! zie § 95). De tegenschemering ontwikkelt haar kleurenzoom, (van beneden naar boven) violet, karmijn, oranje, geel, groen, blauw. Daarboven de heldere weerschijn.

*Zonshoogte* -2$^{o}$ *tot* -3$^{o}$; 15 *tot* 20 *minuten na zonsondergang*.

In 't Westen. - Nu ontstaat het belangwekkendste van alle schemeringsverschijnselen. Aan de top van de heldere lichtschijn, op ongeveer 25$^{o}$ boven de gezichteinder, ontstaat een rozerode vlek; ze wordt snel groter en groter, maar haar denkbeeldig middenpunt glijdt tevens naar beneden, zodat ze zich als een steeds vlakker wordend segment ontwikkelt. Dit *purperlicht* straalt in wonderbaar zachte, doorschijnende tinten, meer rose en zalmkleurig dan eigenlijk ‘purper’. De horizontale strepen zijn matter van kleur geworden.

In 't Oosten. - De aardschaduw al hoger. De bovenste tegenschemering bereikt haar sterkste ontwikkeling. Daarboven de heldere weerschijn.

*Zonshoogte* -3$^{o}$ *tot* -4$^{o}$; 20 *tot* 30 *minuten na zonsondergang*.

In 't Westen. - De heldere lichtschijn is nog 5$^{o}$-10$^{o}$ hoog.

Sterkere ontwikkeling van 't purperlicht: de grootste lichtsterkte op 15°-20° boven de gezichteinder, de bovenste grens ongeveer op 40° hoogte.

*Zonshoogte* -4° *tot* -5°; 30 *tot* 35 *minuten na zonsondergang*.

In 't Westen. - Sterkste ontwikkeling van het purperlicht; gebouwen die naar 't W. gekeerd zijn, worden met purpergloed overgoten, de bruine aarde heeft een warme tint gekregen, ook de stammen der bomen (berken!). Te midden van de stad, in nauwe straten waar men de westelijke horizon niet ziet, kan men aan de algemene belichting der gebouwen duidelijk merken dat het purperlicht aan 't stralen is. Vooral niet te lang naar de Westhemel kijken! In de kamer blijven, en slechts af en toe naar buiten gaan om waar te nemen.

In 't Oosten. - In de aardschaduw stijgt soms een bleke, vleesrood getinte zoom op: *de onderste tegenschemering*; hij ontstaat doordat nu het purperlicht in plaats van de zon zelf het Oosten belicht. Dit verschijnsel is in ons klimaat slechts zelden waarneembaar.

De sterren van de 1e grootte zijn zichtbaar geworden.

*Zonshoogte* -5° *tot* -6°; 35 *tot* 40 *minuten na zonsondergang*.

In 't Westen. - De heldere lichtschijn is verdwenen. Nu begint het purperlicht weg te zinken; blijkbaar vermengt het zich met de horizontale strepen, want deze worden helderder, oranjekleurig.

In 't Oosten. - De grens van de aardschaduw is helemaal vervaagd. Als er een onderste tegenschemering is, ziet men daaronder een tweede zwakke aardschaduw oprijzen op het ogenblik dat het purperlicht verdwijnt.

*Zonshoogte* -6° *tot* -7°; 45 *tot* 60 *minuten na zonsondergang*.

In 't Westen. - Het purperlicht verdwijnt, er blijft nog een blauwachtig witte lichtschijn, *de schemeringsschijn*, die 15°-20° hoog reikt. De horizontale strepen kleuren zich oranje-geel-groenig. Door de verdwijning van het purperlicht krijgen we de indruk dat de belichting van het landschap snel afneemt; lezen wordt moeilijk, 'de burgerlijke schemering' is ten einde.

*Zonshoogte* -9°.

In 't Westen. - De schemeringsschijn bereikt nog 7° tot 10°.

In 't Oosten. - De onderste tegenschemering is verdwenen, er blijft alleen een laatste, zeer zwakke weerschijn.

Het donkerste punt van de hemel bevindt zich nu nabij het zenith, iets naar het Westen toe.

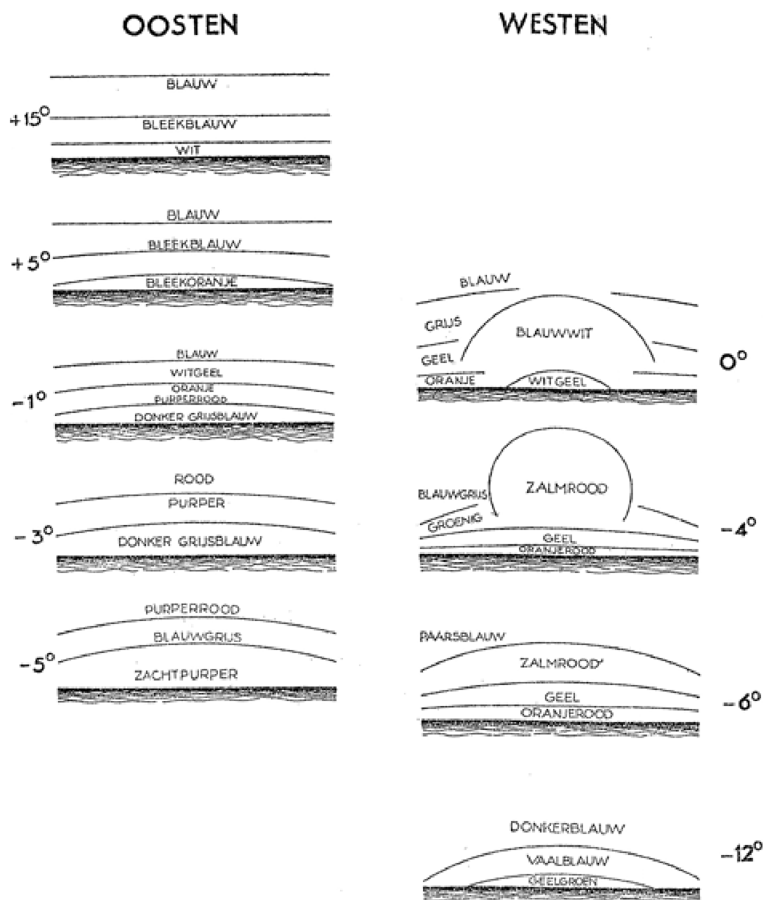



Fig. 148. De kleuren van de lucht bij zonsondergang en heldere hemel. De getallen geven aan hoe hoog de zon boven of beneden de kim staat.

*Zonshoogte* -12°.

In 't Westen. - De horizontale strepen zijn zeer verzwakt, vaal groenig. De groenblauwe schemeringsschijn nog 6° hoog.

*Zonshoogte* -15°.

In 't Westen. - Schemeringsschijn nog 3°-4° hoog.

*Zonshoogte* -17°.

In 't Westen. - Schemeringsschijn verdwenen.

Sterren van de 5e grootte worden al zichtbaar. Dit ogenblik is vrij scherp te bepalen, het is veranderlijk volgens het jaargetijde en van dag tot dag. ‘De astronomische schemering’ is ten einde.

*Zoals de schapen van de heide, laat*
*Door 't groene avondlicht gaan* ....

*H. Gorter, Mei, blz*. 23.

*Opmerking over het purperlicht*. -

De sterkte van het purperlicht is zeer veranderlijk van dag tot dag. De aanwezigheid van heel ijle, hoogzwevende wolkensluiers kan het in hoge mate versterken; het ontwikkelt zich dikwijls opvallend mooi wanneer na een lange reeks regendagen het weder voor 't eerst opgeklaard is. Gemiddeld is het in nazomer of herfst sterker dan in lente of zomer. Het purperlicht is weinig gepolariseerd, terwijl de omringende delen van de hemel het juist sterk zijn: de proef met de bundels van Haidinger is al voldoende om dit verschil aan te tonen (§ 182).

De ontwikkeling welke het in de loop van de schemering vertoont, is niet altijd die welke wij geschetst hebben. Het kan op een van de volgende wijzen ontstaan[1)]:

1. uit de bruine ring die de heldere lichtschijn omzoomt;
2. uit de heldere lichtschijn zelf, die van geel in rose en purper overgaat;
3. uit de tegenschemering, die stijgt, min of meer onzichtbaar over 't zenith heen gaat, het Westen bereikt en daar zichtbaar wordt;
4. uit fijne cirruswolkjes die door de reeds ondergegane zon verlicht worden;
5. uit een purperen vlek, die zich aan de bovenkant van de heldere lichtschijn vormt en uitbreidt. Dit laatste is het klassieke niet zo heel veel voorkomende geval, dat we in de tekst beschreven hebben.

1) Gruner, Beitr. z. Phys. d. freien Atm. **8**, 1, 1919.

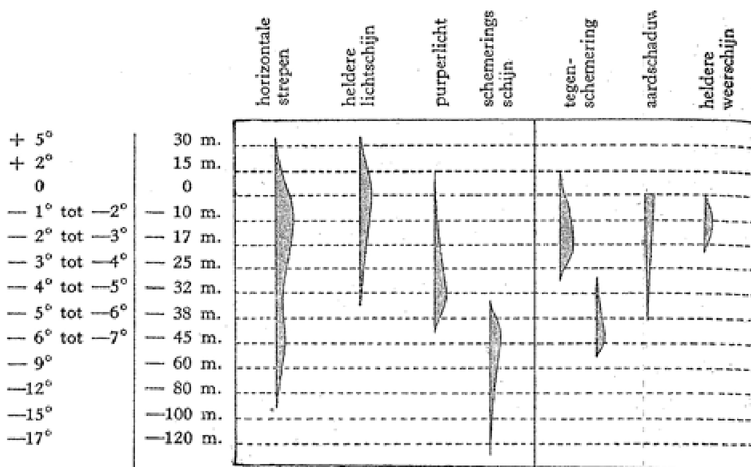


Fig. 149. Samenvattende tabel, de ontwikkeling der verschillende schemeringsverschijnselen voorstellend.

*Ik zou iederen leerling, die zijn kleurenzin ontwikkelt, willen vragen om elke morgen een kwartier voor te behouden voor het waarnemen van de zonsopgang. Hij zal bevinden dat zijn gedachten gedurende de rest van de dag er rustiger en reiner van worden.*

*Ruskin, The Ruskin Art Collection, XXI, 106*.

*Als het ook maar enigszins mogelijk is, mis dan* nooit *het schouwspel van zonsondergang en dageraad.*

*Ruskin, The Laws of Fesole, XV, 362*.

## 190. Metingen aan schemeringsverschijnselen.

Gemakkelijk te meten is de hoogte van de aardschaduw (vgl. de methoden § 235). Zet die hoogte grafisch uit als functie van de tijd: de aardschaduw stijgt eerst ongeveer even snel als de zon daalt; daarna 2, zelfs 3 maal zo snel.[1)] De hoogte boven de

1) Over de theoretische verklaring van de snelheid waarmee de aardschaduw opstijgt zie men Pernter-Exner. Vooral *niet* raadplegen: H. Dember en M. Uibe, Ann. d. Phys. **62**, 517, 1920.

horizon waarop de aardschaduw verdwijnt geeft onmiddellijk een indruk van de reinheid van de lucht, het is een scherp reagens op de geringste troebelheid: hoe meer stofdeeltjes, hoe eerder de schaduw onzichtbaar wordt.

Moeilijker zijn de metingen aan de heldere lichtschijn en aan het purperlicht. Behalve dat het oog telkens uitrusten moet, dient men te bedenken dat alle donkere silhouetten tegen de achtergrond van de hemel kontrasteffekten zouden geven en dus te vermijden zijn; het is verrassend, hoe alleen al het uitsteken van een latje, van een potlood, invloed heeft op de plaats waar wij de grens van het purperlicht schatten. De beste methode is het vergelijken van de hoogte met bomen of torens in het landschap.

Het is de moeite waard hier aan te stippen, dat metingen van de helderheid van de hemel hebben aangetoond, dat het purperlicht volstrekt niet in *een toenemen van de helderheid* bestaat, maar in *een langzamer afnemen* voor een bepaald deel van de hemel dan voor de omringende delen. Zo komt er dan een maximum van de *relatieve* helderheid tot stand; en ons oog krijgt de indruk dat zich hier nieuwe straling ontwikkelt. Ook de gewijzigde kleur is toe te schrijven aan het langzamer afnemen in bepaalde golflengten dan in andere.

Na het wegzinken van het purperlicht is de beweging van de schemeringsschijn belangwekkend. De bovenste begrenzing ervan is eigenlijk het laatste stadium van de aardschaduw, die over het zenith heen is gegaan, en nu aan de Westzijde verschijnt. Ze daalt eerst zeer snel, dan langzamer en langzamer.

### 191. Schemeringsstralen.

*Als de dagbruid zich baadt, en voor 't schuchter gelaat*
*Een waaier van vlammen ontplook.*

*Perk, Iris.*

*De roosvingerige dageraad.*
*Homeros.*

De schemeringsverschijnselen krijgen een zeer bijzondere schoonheid, als er achter de westelijke horizon enkele wolken verborgen zitten, wier schaduwstrepen zich dan als een reuzenwaaier over de avondhemel uitstrekken. Zij stralen uit van het denkbeeldige punt onder de horizon waar zich de zon bevindt, geheel op de wijze van het ‘watertrekken’[1]; maar ditmaal is de hemel zeer helder, en nu zien wij hoe de donkere bundels zich vooral aftekenen op de plaats van het purperlicht, waartegenover zij door hun blauwgroene kleur bijzonder goed uitkomen, te

1) Vgl. § 188.

meer, omdat het oog hier nog een subjektief kleurkontrast aan toevoegt. De schemeringsstralen tonen ons hoe de hemel er zou uitzien als de purperen verstrooiing ontbrak; nu bemerken we pas hoe ver zich het purperlicht eigenlijk uitstrekt! Meer dan eens kan men de schemeringsstralen niet alleen aan de zijde der ondergaande zon waarnemen, maar ook *daartegenover aan de oostelijke hemel*, en wel op de purperen achtergrond van de tegenschemering, waar zij in het tegenpunt van de zon bijeenkomen.

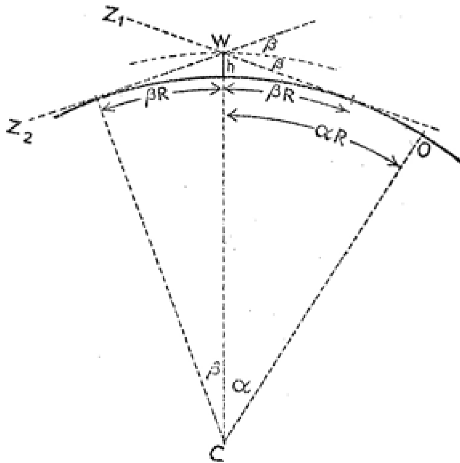



Fig. 150. Schatting van de afstand der wolken, die schemeringsstralen veroorzaken.

Als men schemeringsstralen ziet, verzuime men dus nooit, even naar de Oosthemel te kijken. Een nauwkeurige waarneming leert, dat de schemeringsstralen aan Oost- en Westhemel precies twee aan twee met elkaar overeenkomen: het zijn blijkbaar *dezelfde* stralen, die eigenlijk over het gehele uitspansel dóórlopen, maar die nabij de uiteinden het best te zien zijn. Soms is het werkelijk mogelijk, de strepen over heel hun weg te volgen, als grote bogen die aan hun uiteinden convergeren. We kennen die lijnen wel, en weten dat het evenwijdige lijnen zijn, die slechts door gezichtsbedrog gewelfd schijnen (§ 108).

Alleen daar waar verstrooiende deeltjes in de lucht zweven worden de schemeringsstralen zichtbaar. Bij het 'watertrekken' van de zon tekenden zij zich af in de lichte nevel; bij het purperlicht, in de veel ijlere stofjes die dit schemeringsverschijnsel veroorzaken. In schemeringen zonder purperlicht ontbreken ook de schemeringsstralen, en zij vertonen zich nooit tegen de groenige delen van het uitspansel. Daarentegen kunnen ze nog lang zichtbaar blijven nadat het purperlicht reeds met de horizontale strepen versmolten is: wel een bewijs dat eerstgenoemd lichtverschijnsel er nog altijd is, en nog een merkbare bijdrage tot het licht van de Westerhemel levert.

Dat de schemeringsstralen beter zichtbaar zijn in de buurt van hun convergentiepunten dan loodrecht daarop, is eigenlijk hetzelfde feit alsdat de schemeringsverschijnselen sterker zijn in het Oosten en in het Westen dan daar tussenin. En dit volgt zelf weer uit de verstrooiingswet (vgl. § 183).

We kunnen nog een schatting maken van de afstand waarop de schaduwwerpende wolk van ons verwijderd is.[1] Als die wolk op de aarde rustte, zou de schemeringsstraal ontstaan op het ogenblik dat de zonnestralen daar aan het aardoppervlak raken. Wanneer de schemeringsstraal dus zichtbaar is op het ogenblik dat de zon een hoek $\alpha$ onder de horizon staat, weten we dat de afstand van de wolk tot ons oog $\alpha$R bedraagt (R =straal der Aarde). Bevond de wolk zich echter in W op een hoogte *h*, dan ziet men uit fig. 150 dat haar afstand tot de waarnemer O alle waarden hebben kan tussen R($\alpha$-$\beta$) en R($\alpha$ + $\beta$), naarmate de zon in richtingen tussen $Z_1$ of $Z_2$ staat, waarbij

$$\cos\beta = \frac{R}{R+h}$$

of bij benadering

$$\beta = \sqrt{\frac{2h}{R}}$$

.

Stel dus dat wij een schemeringsstraal waarnemen een half uur na zonsondergang, dus bij een zonnestand onder de horizon $\alpha = 4^\circ$. De soort wolken die dit verschijnsel veroorzaken komt stellig niet hoger dan 5 km voor, dus is $\beta$ op zijn hoogst

$$\sqrt{\frac{2\times 5}{6400}} =$$

= 1/25 rad of $2^\circ$,3. Bijgevolg komen $\alpha - \beta$ en $\alpha + \beta$ overeen met $1{,}7^\circ$ = 0,03 en $6^\circ$,3 = 0,11; de afstand der wolk ligt dus tussen 190 en 700 km. Zo kan men begrijpen dat dergelijke schemeringsstralen soms verschijnen, wanneer de lucht voor ons geheel onbewolkt is.

## 192. De verklaring van de schemeringsverschijnselen. (fig. 151).

Wij stellen ons de zonnestralen voor bij zeer lage zon; ze leggen een grote afstand af door de dampkring en kleuren zich roder en roder naarmate de lichtverstrooiing aan de luchtmolekulen de violette, blauwe en groene stralen wegverstrooit. Zo krijgt de ondergaande zon haar koperrode kleur; en als ze achter de ge-

1) Wetter, **9**, 1892.

zichteinder verborgen is, verlichten haar stralen nog de luchtlagen boven ons hoofd. De onderste lagen zijn het dichtst en verstrooien het meest, de hogere lagen worden ijler en ijler en verstrooien minder en minder. Bevinden we ons in $O_1$ en kijken we naar boven, in de richting $O_1A$, dan is de laag weinig dik, en daarenboven verstrooien de luchtmolekulen niet veel licht onder $90^o$: bij het zenith zal het dus donker zijn. Daarentegen zien we veel verstrooid licht in de richtingen $O_1B$ en $O_1C$, omdat onze blik dan een lange weg door de belichte laag aflegt. Het licht dat van de richting B komt zal het sterkste zijn, omdat zich bij de luchtverstrooiing

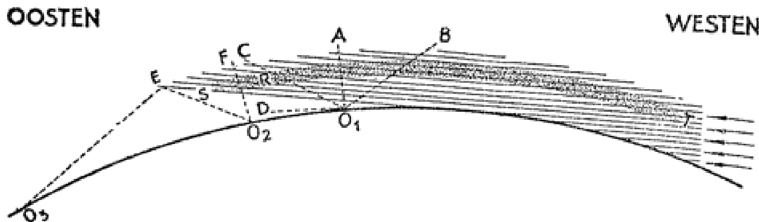


Fig. 151. De verklaring der schemeringskleuren.

nog de stralen voegen, die onder kleine hoeken verstrooid zijn door de grotere stofjes en druppeltjes. Zo begrijpen we het ontstaan van *de horizontale strepen*, waarvan de richting overeenkomt met de gelaagdheid van de grotere deeltjes; anderzijds is ook *de tegenschemering* in de richting $O_1C$ verklaard, die van blauw over groen en geel in rood overgaat naarmate wij de blik laten dalen, tot hij tenslotte door lagen gaat, zo dicht en zo uitgestrekt, dat ze alleen nog door de rode stralen verlicht worden. Nog lager, in de richting $O_1D$, zouden we geen licht zien, want daar strekt *de aardschaduw* zich uit, was het niet dat de voorwerpen die zich daar bevinden een zwakke diffuse verlichting van alle kanten van de hemel krijgen, waarbij alle tegenstellingen verdwijnen. Enige tijd later bevinden we ons in $O_2$, en verdwijnt voor ons de rode zoom der tegenschemering, als n.l. de blik een grotere hoek maakt met de richting der zonnestralen, en niet rakelings meer langs het scheidingsvlak van belichte en onbelichte lucht kan gaan: de lichtstraal uit E brengt niet genoeg licht meer aan, terwijl een steiler verlopende straal uit F evenveel blauw als geel of rood aanbrengt. De grens van het belichte deel van de dampkring wordt dus voortdurend minder scherp en minder gekleurd.

Nog later zijn de verlichte dampkringslagen zoveel steiler gaan hellen, dat we aan de westelijke kant van de hemel ook geen roodkleuring meer zien. We moeten ons nu den waarnemer in $O_3$ denken. De grens E van de verlichte dampkring, die eerst als grens van de aardschaduw was opgestegen aan de Oostkant, is hoger en hoger gekomen, is (onzichtbaar) het zenith gepasseerd, en verschijnt nu voor ons weer aan de Westzijde: want de blik die naar E gericht is vormt weer een kleinere hoek met het scheidingsvlak belicht-onbelicht; daarenboven gaat de verstrooiing aan grote deeltjes onder kleine hoeken weer een rol spelen; en tenslotte is het gehele landschap zoveel donkerder geworden, dat reeds een geringe lichtsterkte opvalt. Vandaar dat we nu weer E terugvinden als bovenste grens van de schemeringsschijn.

Tenslotte hebben we nog het purperlicht te verklaren.[1)] Het is gebleken dat dit alleen gaat, door aan te nemen dat er tussen 10 en 20 km hoogte een laag ST van zeer fijne stofdeeltjes voorkomt. De bundel lichtstralen die deze laag verlicht, is afkomstig van de reeds onder de horizon gedaalde zon: hij is dus sterk rood gekleurd in zijn onderste delen, waar hij door de langste en dichtste luchtlagen gegaan is. Het gedeelte SR van de laag draagt dus het meeste bij tot het verschijnsel van het purperlicht. Het opmerkelijke is echter, dat de lichtverstrooiing van SR alleen gezien wordt door de waarnemer in $O_2$, en niet door die in $O_1$ (welke haar in het Oosten zou moeten zien). Dit is dus een bewijs dat de lichtverstrooiende stofjes aanzienlijk groter dan de luchtmolekulen zijn, en voornamelijk het licht *naar voren* verstrooien (vgl. § 183). Telkenmale als we 's avonds het purperlicht zien ontstaan, moeten we ons voorstellen dat we nu in de gunstige verstrooiingskegel zijn gekomen.

## 193. Is er verschil tussen de ochtend- en de avondschemering.

Zo weinig, dat men niet in staat is werkelijk typische verschillen aan te geven. Van belang is, dat het oog 's ochtends goed uitgerust is en de lichtsterkte steeds ziet *toenemen*, zodat het gevoeliger is voor de schemeringsverschijnselen dan 's avonds. In 't algemeen zijn de verschijnselen 's avonds rijker aan kleuren,

1) P. Gruner, Helv. Phys. Acta, **5**, 351, 1932.

vooreerst doordat er dan wat meer waterdamp in de lucht is, en doordat de lucht dan wat meer turbulent is en meer stofdeeltjes bevat dan 's ochtends.

### 194. ‘Het donkerste uur komt even voor de dageraad.’[1)]

Denning, de beroemde waarnemer van vallende sterren, gelooft dat dit Engelse spreekwoord letterlijke waarheid bevat. Even vóór het krieken van de dag schijnt het hem dat voorwerpen verdwijnen, welke tot hiertoe goed zichtbaar waren; een zenuwachtig gevoel komt over hem.

Inderdaad vindt men in de meetreeksen wel eens grillige schommelingen, maar die zijn te veranderlijk en te zwak om hun een werkelijke betekenis te kunnen toekennen. Ik vermoed, dat de eerste ochtendklaarte wellicht de goede aanpassing van het oog verstoort, en toch te zwak is en tot een te klein gedeelte van de hemel beperkt om merkbaar te kunnen verlichten.

### 195. Morgen- en avondrood als weervoorspelling.[2)]

*Als het avond geworden is, zegt gij: Schoon weder, want de hemel is rood.*
*En des morgens: Heden onweder, want de hemel is droevig rood.*
*Gij geveinsden! het aanschijn des hemels weet gij wel te onderscheiden, en kunt gij de teekenen der tijden niet onderscheiden?*
*Matth. XVI*: 2-3.

Een modern statistisch onderzoek heeft inderdaad aangetoond dat deze zo oude en zo verspreide voorspellingsregel in de meerderheid der gevallen uitkomt. De verklaring verschilt enigszins van geval tot geval. Bij hoge druk en mooi weer is er 's ochtends bijna altijd lichte nevel, en men ziet dus geen morgenrood; 's avonds is de lucht zuiver, en men ziet het purperlicht.

Als bij zonsondergang de westelijke hemel bleekgeel is, vaal, druilerig, geldt dit als aankondiging van regen en storm.

*Uw zon zinkt weenend in 't laag Westen neer,*
*En kondigt wee en storm aan en boos weer.*

*Shakespeare, Richard II, Act* II, *Sc.* 10.

1) M.W.R. **42**, 503, 1914.
2) A.H. Borgesius, Hemel en Dampkring, **17**, 145, 1920.

## 196. Storingen in 't normale verloop van de schemering.

De schemeringsverschijnselen zijn een uiterst fijn reagens op de zuiverheid van de hoge luchtlagen. De buitengewoon kleurrijke zonsop- en ondergangen in de jaren 1883-1886 waren een rechtstreeks gevolg van de aanwezigheid van fijnverdeelde vulkanische as, die bij de uitbarsting van de Krakatau in Nederlands-Indië hoog in de lucht geslingerd werd, en zich in de loop van enige maanden om de hele aardbol verspreidde. Maar reeds voor die tijd en ook daarna zijn er herhaaldelijk kleinere optische storingen geweest, die men meestal met vulkanische uitbarstingen in verband heeft kunnen brengen:

1831, Pantellaria bij Sicilië; - 1902 tot 1904, Mt. Pelée; - 1907 tot 1909, Sjadutka op Kamtsjatka; - 1912 tot 1914, Katmai in Aljaska. Telkens als er een flinke uitbarsting van de Vesuvius of de Etna geweest is, kan men abnormale schemeringsverschijnselen in onze streken verwachten, maar het duurt gewoonlijk ruim een week eer de fijnverdeelde as zich tot hier heeft uitgebreid.[1)]

Het schijnt zeer waarschijnlijk, dat een sterke ontwikkeling van de vlekken en protuberansen op de zon insgelijks tot storingen in de schemeringsverschijnselen aanleiding geeft, waarschijnlijk omdat de elektronen, ionen en atomen die de Zon dan uitzendt, tot de ionisatie in onze dampkring aanleiding kunnen geven. Dergelijke maxima zouden te verwachten zijn omstreeks 1938 en 1949.

Een derde storingsoorzaak is opgemerkt, toen de Aarde op 18/19 Mei 1910 door de staart van de komeet van Halley is gegaan: de prachtige schemeringsverschijnselen schenen er op te wijzen, dat stofdeeltjes van de staartster in onze dampkring waren overgegaan (§ 167). Even opvallend waren de verschijnselen, toen de Aarde in 1908 getroffen werd door een groot meteoorblok, dat in de verlaten vlakten van Noord-Siberië neerkwam.

De voornaamste optische verschijnselen waaraan men het optreden van een storingsperiode kan herkennen zijn de volgende.

1. De '*ring van Bishop*': de zon staat heel de dag in het midden van een glanzende, blauwachtig witte schijf, die zelf door een roodbruine ring omzoomd is.[2)] Het helderste deel van de ring heeft een straal van de orde van $15^{o}$. Bij zeer lage Zon vervormt hij zich tot een soort driehoek met horizontale

1) A.N. **220**, 15, 1923.
2) Dorno, Met. Zs. **34**, 246, 1917.

basis. Dat deze ring zeer hoog in de dampkring ontstaat, blijkt uit het feit, dat men er cirruswolken onderdoor kan zien trekken.

2. Een dergelijke koperrode ring is soms ook om het tegenpunt der Zon waar te nemen, zijn straal is ongeveer 25°.[1)]
3. Het blauw van de hemel is troebel, witachtig; als de Zon laag staat, is ze dofrood, want ze schijnt door een laag heiigheid. De sterren van de 6e en zelfs van de 5e grootte zijn niet meer te zien.[2)]
4. Abnormaal weinig halo's.[2)]
5. Abnormaal heldere nachten.
6. Abnormaal sterk, vurig purperlicht.
7. Napurperlicht. Dit is een wijziging in 't verloop der schemering. Als het purperlicht weggezonken is, en de Zon reeds 7-8° onder de kim staat, verschijnt een zwakke, rood-violette lichtschijn op dezelfde plaats waar het purperlicht ontstaan was, ontwikkelt zich op dergelijke wijze, en zinkt weg wanneer de Zon 10°-11° onder de gezichteinder staat.
8. Ultracirren (vgl. § 198).
9. Lichtende nachtwolken.
10. De Maan ziet er groenachtig uit.[3)]

De sterkste dezer verschijnselen vallen ook den oningewijde op. Maar de fijne onderscheidingen, die maken dat geen twee Zonsondergangen aan elkaar gelijk zijn, en die een scherp herkenningsmiddel zijn voor de geringste optische storing, kunnen slechts na lange oefening waargenomen worden.[4)]

## 197. De lichtschijn om de Zon.[5)]

Als we ons zo plaatsen dat de rand van een dak de Zon voor ons bedekt, dan zien we dat er zich een lichtschijn aan alle kanten om de Zon uitstrekt, geleidelijk zwakker wordend bij toenemende afstand. Hij is ook goed waar te nemen als u in een tuinbol kijkt, van een paar meter afstand, en met uw hoofd het zonnebeeld bedekt. Sommige waarnemers beweren dat hij uit twee onderdelen bestaat: *a.* een zilverwitte schijf, van ongeveer 2°-5° straal,

1) Hemel en Dampkring, **10**, 156, 1913.
2) Nat. **91**, 681, 1912.
2) Nat. **91**, 681, 1912.
3) Ann. Soc. Met. France, **53**, 1903.
4) Voorbeeld van uitvoerige bestudering ener reeks storingen met behulp der schemeringsverschijnselen: C. Dorno, Abh. preuss. Met. Instit. **5**, 1917.
5) J. Maurer, Met. Zs. **32** en **33**, 1915-1916. - Wetter, **33**, 275, 1916. - A.N. **201** en **203**, 1915-1916.

nogal veranderlijk, vooral 's namiddags opkomend; *b*. een veel groter lichtschijn, met een straal van wel 30°-40°, bijna nooit ontbrekend, en bij de schemering overgaand in 'de heldere lichtschijn'. Anderen onderscheiden een geelachtig witte 'aureool' van ¼°-2° straal, een blauwachtig witte 'krans' van 2°-5°, een 'middenste schijf' van 15°-23°, een 'inwendige schijf' van 10°-40°, een 'uitwendige schijf' van 25°-70°. De afmetingen zijn sterk afhankelijk van de zonshoogte en variëren van dag tot dag. Het schijnt bijvoorbeeld dat als de Zon zeer laag staat, minder dan 2 ° boven de horizon, een soort aureool van vaalgele stralen om het hemellichaam optreedt. Komt ze nog lager dan 1° boven de kim, dan verdwijnt deze stralenkrans weer.[1)]

Een exakte fotometrie van het licht om de Zon is zelden uitgevoerd. Waarschijnlijk is hetgeen men als een 'ring' ziet, eenvoudig een iets langzamer afneming van de lichtsterkte, die anders geleidelijk daalt bij toenemende afstand van de Zon. Dit verstrooide licht ontstaat stellig door buiging van het zonlicht, aan stofdeeltjes, waterdruppeltjes of ijskorreltjes, maar die alle voornamelijk onder kleine hoeken verstrooien (§ 183). Doordat ze allerlei grootten hebben, overdekken de verstrooiingsaureolen en kransen elkaar, en is er nauwelijks sprake van kleuren. De veranderlijke helderheid en lichtverdeling in deze lichtschijn is een maatstaf voor de zuiverheid der lucht, zodat het zeer de moeite waard is die te blijven waarnemen. Zij verraden onmiddellijk het optreden van de optische storingen van de dampkring, en staan in nauw verband met de schemeringsverschijnselen.

Wanneer er vulkanische as in de lucht zweeft, verschijnt een onduidelijke bruinrode ring als omtrek van de heldere lichtschijn: de ring van Bishop (§ 196).

## 198. Schemeringscirri of ultracirruswolken.

Het gebeurt meer dan eens, dat de hemel vóór zonsondergang wolkenloos lijkt, en dat hij enige tijd daarna zeer ijle wolkengolvingen vertoont, laag boven de Westerkim, blauwachtig grijs gekleurd. Zeer merkwaardig is, dat ze alleen zichtbaar zouden zijn omstreeks zonsondergang, en daarna bij een stand van -3° en bij -7°; want dit zou bewijzen, dat ze slechts bij bepaalde

[2)]

1) J. Plassmann, Met. Zs. **48**, 421, 1931.
2) M. Wolf, Met. Zs. 33, 517, 1916.

belichtingsrichtingen zichtbaar worden. Deze waarneming is echter nog tè zelden gedaan om er algemene betekenis aan te hechten. Het verschijnen van ultracirruswolken gaat meestal gepaard met bijzonder kleurige zonsondergangen en optische storingen (§ 196), zodat men aanneemt dat ze uit vulkanisch stof bestaan. Ze zijn zo ijl, dat men ze bij dag niet ziet, maar verschijnen blijkbaar in de schemering, omdat ze dan sterk verlicht op een donkerder grond worden waargenomen. Aangezien ze bij een zonshoogte $-7^{o}$ slechts tot $10^{o}$ boven de kim te zien waren, moet hun hoogte niet veel meer dan 11 km hebben bedragen; ze zweven dus in de onderste stratosfeerlaag.

## 199. Lichtende nachtwolken[1)] (Plaat XII).

Dit zijn zeer ijle wolken, veel hoger dan alle andere soorten, maar die ook wel in gewone tijd verschenen zijn; merkwaardigerwijze zijn ze alleen gezien binnen de gordels tussen $45^{o}$ en $60^{o}$ noorder- en zuiderbreedte, en vooral van midden Mei tot midden Augustus (op onze breedte; kijk vooral omstreeks eind Juni!).

Zolang de Zon nog niet onder is, schijnt de hemel volmaakt helder. Ongeveer een kwartier na zonsondergang beginnen ze zich soms al te vertonen als fijne veren, ribbels of banden; maar het duidelijkst worden ze slechts een uur of langer na zonsondergang: ze tekenen zich *helder* af tegen de achtergrond van de 'schemeringsschijn' (§ 189), terwijl gewone cirruswolken *donker* zijn. Het is dus duidelijk dat ze nog in volle zonneschijn baden, en dus hoog in de stratosfeer zweven; echt 'lichtgevend' zijn ze niet. Uren lang kan men nog hun blauwachtig wit licht waarnemen, maar naarmate het later wordt is het verlichte oppervlak van de laag kleiner en minder hoog boven de gezichteinder; omstreeks middernacht is het minimum bereikt, het schijnt dat ze na middernacht weer helderder worden dan ervóór. Hoger dan $10^{o}$ boven de gezichteinder ziet men ze slechts zelden.

Zeer treffend is hun geheimzinnige zilverwitte glans, die slechts nabij de gezichteinder in goudgeel overgaat. Ze moeten blijkbaar uit zeer fijn stof bestaan dat in hoofdzaak blauw licht verstrooit (§ 171): want door een rood glas ziet men ze niet, door een blauw

1) O. Jesse, Met. Zs. 1884-1892. - E.H. Vestine, J.R.A.S. Can. **28**, 1934. -C. Störmer, Univ. Observ. Oslo, Publication No. 6, 1933. - Astrophysica Norvegica, **1**, 87, 1935. - R. Süring, Naturwiss. **23**, 555, 1935; ook in: Die Wolken, blz. 30 (Leipzig 1936), met litteratuurlijst. - Overzicht door D. Koelbloed in Hemel en Dampkring, **33**, 175 en 241, 1935.



PLAAT XII.
Lichtende nachtwolken.
Naar C. Störmer, Vidensk. Akad. Oslo Avh. I, 1933, No. 2, Pl. IX. Cliché in bruikleen van de Akademie der Wetenschappen te Oslo.

glas echter wel. Zo kan men begrijpen dat ze zich niet met de rode gloed van de schemering kleuren; slechts stralen die op een zekere hoogte door onze dampkring gaan en niet rood gekleurd worden, zullen door de nachtwolken verstrooid worden. Sommige onderzoekers beweren dat hun licht *niet gepolariseerd* is; andere spreken van *sterke polarisatie*[1)] (met de elektrische trilling loodrecht op het vlak Zon-wolk-Aarde, dus zoals bij de blauwe lucht en bij allerlei soorten verstrooiing). Kan het zijn dat de lichtende nachtwolken sòms uit grotere en sòms uit kleine deeltjes bestaan?

De hoogte kunnen we bepalen uit de grens van het verlichte stuk, liefst bij verschillende standen van de Zon onder de gezichteinder waargenomen. Men vond dat de bovenste grens in een bepaald geval een hoek $\alpha = 10^{\circ}, 5^{\circ}, 3^{\circ}$ boven de kim bereikte, wanneer de zon op een diepte $\beta = 12^{\circ}, 13^{\circ}, 14^{\circ}$ onder de horizon stond.[2)] De aldus gevonden hoogte moet dan nog wel wat vermeerderd worden, omdat de stralen die aan de Aarde raken niet verstrooid worden. - De nauwkeuriger methode bestaat in het fotograferen vanuit twee stations; ze levert als resultaat, dat de hoogten meestal 75-90 km bedragen. Is de hoogte bekend, dan kan men ook de ware grootte vinden van de ribbels die zich in deze nachtwolken aftekenen; de afstand van ribbel tot ribbel bedroeg gemiddeld 6 tot 9 km.

De lichtende nachtwolken krijgen een bijzondere betekenis door het feit dat zij alleen ons kunnen inlichten over de stromingen in de hoogste lagen van onze dampkring (afgezien van enkele schaarse meteoorwaarnemingen). Als men niet over foto's beschikt, bepaalt men de snelheid met de wolkenspiegel; meestal komen ze uit NO met een snelheid van 40-80 m/sec, soms uit WNW met een snelheid van 30 m/sec; soms zijn snelheden tot 300 m/sec gemeten.

Men heeft vroeger meestal aangenomen, dat het geheimzinnig lichtverschijnsel der lichtende nachtwolken toe te schrijven is aan vulkanisch stof, hetwelk bij sterke uitbarstingen zeer hoog in de dampkring wordt geworpen. Tegenwoordig heeft men het echter zo dikwijls waargenomen dat men ook denkt aan zeer fijn stof, afkomstig uit de wereldruimte, dat op dezelfde wijze in onze dampkring gedrongen is als de vallende sterren en meteorieten

1) Met. Zs. **25**, 1908.

2) Met. Zs. **9**, 413, 1892. Men bewijst gemakkelijk dat de hoogte der nachtwolken $= \frac{R}{4}\beta^2\left(\frac{2\alpha+\beta}{\alpha+\beta}\right)^2$, wanneer R de straal der Aarde voorstelt, $\alpha$ en $\beta$ in radialen uitgedrukt zijn.

en wellicht te wijten kan zijn aan kometen, welke in de nabijheid der Aarde kwamen en daar vrij grote hoeveelheden kosmisch stof hebben achtergelaten. De grote meteoorsteen die in 1908 in Siberië viel, werd onmiddellijk gevolgd door zeer opvallende verschijningen van de lichtende nachtwolken. In andere gevallen blijft de vulkanische oorsprong waarschijnlijker.[1)]

Voor de fotografie: een lichtsterke camera is wenselijk. Met een lens *f*/3 waren de belichtingstijden 16 sec, 35 sec, 72 sec, 122 sec, wanneer de Zon resp. $9^{o}$, $12^{o}$, $14^{o}$, $15^{o}$ onder de kim stond.[2)]

## 200. De nachtschemering en de nachtelijke lichtverschijnselen.

*Bij het donkere licht, dat van de sterren daalt,...*

*Corneille, le Cid.*

Om de zwakste schemeringsverschijnselen te onderzoeken, moeten we 's nachts beginnen, en met zeer goed uitgerust oog de aanvang der ochtendschemering waarnemen. We kiezen een nacht zonder maneschijn, bij volmaakt heldere lucht, in Mei of in Augustus-September, en zoeken *een waarnemingsplaats die zo ver mogelijk van menselijke woningen verwijderd is;* - Het kost enige moeite, de sleur van onze gewone dagindeling te overwinnen, en omstreeks middernacht te beginnen met enige uren waarneming in de open lucht! Maar als de eerste weerstand overwonnen is, zullen we onvergelijkelijk genieten van het grootse schouwspel dat zich voor ons ontvouwt.

De stadsbewoner heeft eenvoudig geen denkbeeld van de pracht van de sterrenhemel. Het is verrassend, in hoe sterke mate onze ogen zich aan de duisternis aanpassen, en hoeveel meer sterren we zien na een uur wachten, dan toen we voor 't eerst buiten kwamen: het is welhaast, alsof de hele hemel lichtgevend was! Men kan nu een aantal hele zwakke lichtverschijnselen waar nemen, waarvan sommige al naar de omstandigheden min of meer duidelijk kunnen zijn of ook geheel ontbreken.[3)]

Vooreerst zien we waarschijnlijk in een paar verschillende richtingen een lichtschijn laag boven de kim; het is de *weerschijn der lichten van verre steden en dorpen*. De ene dag is hij duidelijker

1) Vgl. de diskussie door R. Süring, Die Wolken, blz. 30-36 (Leipzig 1936).
2) Met. Zs. **9**, 413, 1892.
3) Enkele dezer verschijnselen zullen nog uitvoeriger besproken worden bij de behandeling der elektrische verschijnselen van de dampkring.

dan de andere, naarmate de lucht bewolkt, heiig of geheel helder is. Wie gewoon is op een bepaalde plaats waar te nemen, leert daar vanzelf rekening mee houden.

Dwars over de hemel loopt *de Melkweg*, als een lint, bestaande uit grote en kleine lichtwolken met donkerder tussenruimten; sommige delen zijn verrassend helder voor degene die nooit een echte sterrennacht heeft waargenomen!

De achtergrond van de hemel wordt helderder als onze blik de gezichteinder nadert: daar is een duidelijke zoom van *aardlicht* om de hele horizon, het helderst op een hoogte van ongeveer 15°. Dit verschijnsel is een soort bestendig, zwak noorderlicht in onze dampkring; dat het dichter bij de kim zwakker wordt, is aan de verzwakking door de lucht te wijten.

In sommige nachten wordt men getroffen door een abnormale *helderheid van de hemel*, terwijl er toch geen Maan is; die algemene helderheid kan tot 4 maal de normale waarde bereiken en zo groot zijn, dat men zijn horloge kan aflezen en grote letters onderscheiden kan[1]. In bepaalde gevallen vertonen zich brede *heldere strepen*.[2] Zij schijnen tweemaal 's jaars bijzonder veel voor te komen, en wel in Augustus en in December, en zouden te wijten zijn aan stofjes uit de wereldruimte, die in onze dampkring dringen.

*Noorderlicht* verschijnselen zijn in ons land wel enkele malen per jaar waar te nemen, althans in jaren met veel zonnevlekken (omstreeks 1938, 1949). Ze verschijnen aan de Noordzijde van de hemel als bogen, stralenbundels enz.; deze laatste bewegen dikwijls vrij snel en worden nu eens langer, dan korter. Niet verwarren met zoeklichten die in de verte aan het bewegen zijn!

Het *zodiakaallicht* geeft aan de hemel een grotere helderheid langs de gehele dierenriem ('zodiak'), opvallend sterk dicht bij de Zon, snel afnemend naar het tegenpunt van de Zon toe. Men ziet het als een schuine lichtpyramide, die van de kim opstijgt, in de lente na zonsondergang in het Westen, in de herfst vóór zonsopgang in het Oosten (vgl. verder § 201).

Waar al deze verschijnselen ontbreken, heeft *de achtergrond van de hemel* nog een duidelijke helderheid. Uw opgeheven hand tekent er zich donker tegen af. Die helderheid is voor 50% te wijten aan de som der miljoenen onzichtbaar zwakke sterren, voor

1) Rayleigh, Proc. R. Soc. **106**, 117, 1924; **131**, 376, 1931.
2) C. Hoffmeister, Die Sterne, **11**, 257, 1931. - Sitzungsber. Akad. München, 129, 1934.

5% aan de verstrooiing van hun licht door de dampkring der Aarde, en voor het overige aan aardlicht.

Tenslotte komen we tot het waarnemen der *nachtelijke schemeringsverschijnselen*.[1] Onderzoek de zoom van aardlichtaan de Noordzijde van de hemel. Daar verheft hij zich een tiental graden hoger in een vlakke welving, die zich ongeveer blijkt te bevinden boven de plaats waar de onzichtbare Zon onder de gezichteinder zit. Het is de *nachtschemeringsschijn*. Men herkent hem daaraan, dat hij mee met de Zon naar het Oosten gaat naarmate het later

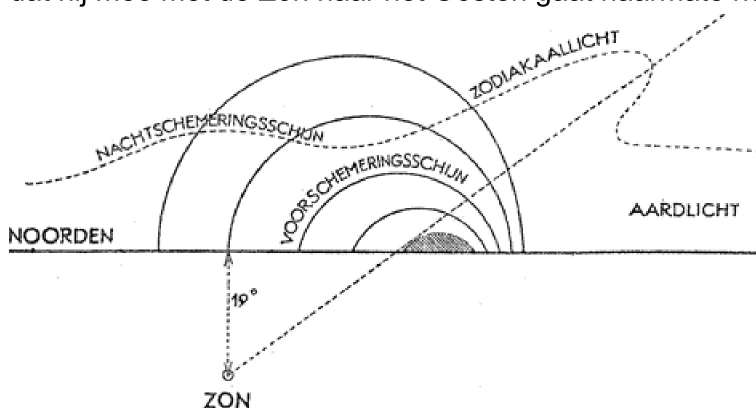



Fig. 152. De nachtschemering.

wordt. Zijn hoogte boven de Zon is van de orde van 40°; in de beste omstandigheden (Groenland) kan men hem tot 55° boven de Zon waarnemen. Het is dus duidelijk dat we in ons klimaat 's zomers nooit de nacht volledig donker zien; de schemering duurt eigenlijk de gehele nacht door. 's Winters pas is onze hemel volledig donker. Zo kan men ook begrijpen dat de tropische sterrenhemel zo diep donker is, daar de Zon in die gewesten zo steil daalt en zo laag onder de horizon komt. - In sommige gevallen is de nachtschemeringsschijn abnormaal sterk.[2]

Twee-en-half of drie uur vóór zonsopgang wordt de schemeringsschijn asymmetrisch; hij verheft zich aan de Oostzijde en

1) Gruner en Kleinert, die Dämmerungserscheinungen, blz. 6 (Hamburg, 1917).
2) M. Wolf, A.N. **203**, 387, 1915.

valt daar steiler af; weldra vervormt hij zich tot een schuin opstijgende lichtkegel, het *zodiakaallicht*, waarvan de as ongeveer de helling der ekliptika heeft (§ 201).

Omstreeks 2½ uur vóór zonsopgang, als de Zon nog 20° onder de gezichteinder is, verschijnt aan de basis van het zodiakaallicht, iets rechts van de Zon, een zeer flauwe blauwachtige lichtschijn, met moeite waarneembaar, langzaam opstijgend en zich daarbij naar links uitbreidend, dus naar de Zon toe (fig. 152): het is *de voorschemeringsschijn*, die in de loop van een half uur het zenith bereikt. - De schemeringsbogen liggen gewoonlijk vertikaal boven de Zon. Als de vóórschemeringsschijn naar rechts verplaatst lijkt, dan is het omdat zijn helderheid zich bij die van het rechts gelegen zodikaallicht voegt; naarmate hij echter sterker wordt, wint hij het, en neemt zijn normale plaats boven de Zon in. Verder blijft hij de Zon begeleiden in haar dagelijkse beweging, en verschuift dus langzaam meer en meer naar rechts.

De zwakste sterren (5e grootte) zijn nu verbleekt, maar de sterkste zijn nog zichtbaar; men kan reeds de grote lijnen van het landschap raden. Aan de Westelijke hemel is de tegenschemering zeer intensief geworden. Nu treedt de gele *schemeringsschijn* op, aan zijn bovenkant wegstervend in groenblauwe tint: de eigenlijke schemering is begonnen, de Zon staat bij -17° tot -16° (zie verder § 186).

In andere delen van het jaar verlopen de verschijnselen nog wel op dezelfde manier, maar de zonshoogte is dan anders: midden Juni bijvoorbeeld komt de Zon maar 15° onder de horizon, zodat dan allerlei verschijnselen onzichtbaar zijn die zich pas bij diepere zonnestanden afspelen.

## 201. Het Zodiakaallicht.[1)]

Als de avondschemering afgelopen is, of 's ochtends vóór het begin der schemering, zien we in bepaalde delen van het jaar het zachtstralende zodiakaallicht als een soort afgeronde lichtpyramide schuin opstijgen. Hoe steiler het oprijst, des te beter kunnen wij het waarnemen; de gunstigste tijden zijn:

in Januari, Februari, Maart, 's avonds aan de Westhemel; in October, November, December, 's ochtends aan de Oosthemel (iets minder gunstig dan aan de avondhemel).

1) Fr. Schmid: Das Zodiakallicht (Hamburg 1928); uitstekende verzameling waarnemingen, maar verdedigt op eenzijdige wijze de aardse oorsprong van het zodiakaallicht. - W. Brunner, Publ. Sternw. Zürich, 1935.

In Juni en Juli is er in ons klimaat niets van te zien, omdat de Zon dan niet diep genoeg onder de gezichteinder komt; het is dan niet te onderscheiden van de laatste schemeringsverschijnselen.

Om de plaats van het zodiakaallicht te vinden, moeten we beginnen met aan de hemel de ‘dierenriem’ of ‘zodiak’ te zoeken: d.i. de grote cirkel die loopt door de sterrenbeelden: *ram, stier, tweelingen, kreeft, leeuw, maagd, weegschaal, schorpioen, schutter, steenbok, waterman, vissen*.

Dit is de weg die wij de Zon ‘zien’ afleggen in de loop van het jaar. De sterrenbeelden waar ze net zit, kunnen we natuurlijk op dit ogenblik niet zien; maar zodra de Zon onder is en de duisternis invalt, wordt het overige deel van de dierenriem zichtbaar. Langs die lijn hangt er een soort lichtgevende nevel, het breedst en het helderst in de nabijheid van de Zon, smaller uitlopend naar beide kanten: aan de éne zijde van de Zon is het gedeelte van het zodiakaallicht dat wij 's ochtends zien, aan de andere zijde dat wat we 's avonds waarnemen. In de winter kan een goed waarnemer wel 6 maanden lang het zodiakaallicht tegelijk 's avonds en 's ochtends zien.

Het licht zelf is zwak, van dezelfde orde als de Melkweg, maar niet zo ‘korrelig’ en meer melkachtig. Men moet het ‘leren zien’. Natuurlijk mag er geen maneschijn zijn; maar ook elke lantaarn, zelfs in de verte, is hoogst hinderlijk, lichtsterke planeten zoals Venus en Jupiter hinderen. De nabijheid van grote steden moet in elk geval vermeden worden; liefst neemt men waar van op een hoogte, met vrij uitzicht in alle richtingen.

Men begint met de omtrek op een sterrekaart te tekenen, ten opzichte van goed kenbare sterren[1)]; daarna tracht men lijnen van gelijke helderheid te schetsen. Het middengedeelte is het helderst, de helderheid valt geleidelijk af naar de top en naar de randen, maar steiler aan de Zuidelijke dan aan de Noordelijke zijde: de grootste helderheid is dus naar het Zuiden verschoven ten opzichte van de symmetrieas der zwakkere delen. Met behulp van dergelijke schetstekeningen kan men schatten, dat de breedte van het lichtverschijnsel, dwars op de as gemeten, ongeveer $40^\circ$, $20^\circ$ en $10^\circ$ bedraagt op afstanden van $30^\circ$, $90^\circ$, $150^\circ$ van de Zon.

Het is de moeite waard, eens een hele nacht te wijden aan de waarneming van het zodiakaallicht, om het wisselende tafereel

1) Speciaal daarvoor geschikte kaartjes zijn uitgegeven in Publ. Kwasan Obs. **1**, No. 3, 1931.

in zijn schone verscheidenheid te bewonderen. - Ongeveer twee uur na zonsondergang, bij een zonnestand -17°, wordt in het Westen een zeer zwakke, wigvormige lichtkegel zichtbaar, schuin naar het Z.W. opstijgend. Bij een zonnestand -20° is het zoveel donkerder geworden, dat men nu een geweldig grote lichtpyramide waarneemt. In de loop van de nacht richt dit West-zodiakaallicht zich meer en meer op en breidt zich uit; in hoofdzaak blijft het steeds in dezelfde stand ten opzichte van de sterren. Een kleine verschuiving is nog net merkbaar: sterren die net iets ten Zuiden stonden komen later meer ten Noorden van het zodiakaallicht te staan. Dit merkwaardige verschijnsel is het best waar te nemen in de eerste helft van de winter. - Langzamerhand begint het West-zodiakaallicht onder te gaan, en het Oost-zodiakaallicht verschijnt in het Oosten. Het is nu tegen middernacht, het ogenblik waarop men zoeken moet naar de beroemde '*Gegenschein*', een van de moeilijkst waar te nemen verschijnselen, die men alleen in zeer heldere winternachten met diepdonkere hemel kan hopen te zien: in het tegenpunt van de Zon, dus ongeveer in het Zuiden, bemerkt men dan een uiterst flauwe lichtbrug, die de toppen van het Oost- en West-zodiakaallicht verbindt. - In de verdere loop van de nacht ziet men nu ook het Oost-zodiakaallicht met de sterren mee bewegen, tevens echter ook een weinig verschuiven: de sterren schijnen zich van de Noord- naar de Zuidkant van de lichtpyramide te verplaatsen. Het is dus weer zò, dat het zodiakaallicht deelneemt aan de dagelijkse wenteling van de hemel, maar een ietsje schijnt achter te blijven t.o.v. de sterren. - De ochtend nadert; bij een zonnestand -20° of -19° is het, alsof de basis van de pyramide van het Oost-zodiakaallicht breder en helderder werd. Bij -19° tot -17° duikt de vóórschemeringsschijn op.

Het zodiakaallicht is een veel samengestelder verschijnsel dan men oorspronkelijk heeft gedacht. In hoofdzaak ontstaat het door de samenwerking van twee oorzaken.

*a*. Een ontzaglijke schijf of ring van kosmisch stof, die de Zon omgeeft en die haar licht verstrooit; wij zien deze stofwolk door de zon verlicht, en langzaam in helderheid toenemend naarmate onze gezichtsrichting meer tot de Zon nadert.

*b*. De nachtschemering (§ 200), die te beschouwen is als het heel zwakke licht dat de hoogste dampkringslagen nog verstrooien en dat dus het laatste stadium der schemering uitmaakt; het is mogelijk dat hier nog een eigen lichtuitzending bijkomt, wanneer deze sterk geioniseerde dampkringslagen in de schaduw der

Aarde komen te liggen, en de ionen gelegenheid krijgen zich weer met elkaar te verbinden. De helderheid van dit licht neemt insgelijks dichter bij de Zon toe, maar deze toeneming is veel sneller dan die van het kosmische bestanddeel van het licht; zijn lijnen van constante helderheid zijn boogvormig over de Zon gewelfd, zoals voor alle echte schemeringsverschijnselen het geval is; ze storen zich niet aan de dierenriem (fig. 152). De samenwerking nu van de lichtverschijnselen *a* en *b* vormt de typische lichtpyramide

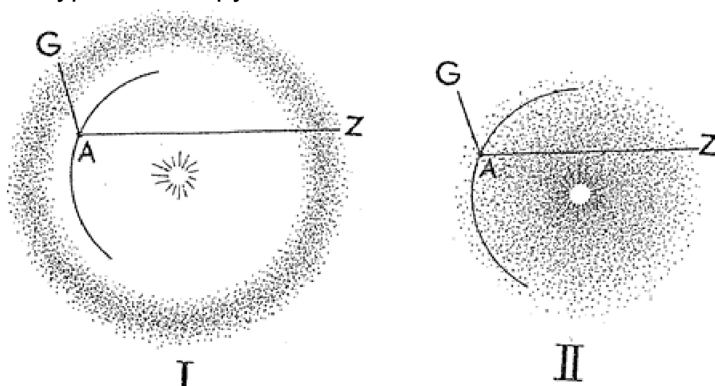


Fig. 153. Twee theorieën voor het ontstaan van het zodiakaallicht.
I. Ring van kosmisch stof buiten de aardbaan.
II. Schijf van kosmisch stof om de Zon.

van het zodiakaallicht; en door de wisselende stand van horizon en dierenriem kan men begrijpen, waarom dit lichtverschijnsel in de loop van de nacht en van het jaar bepaalde kleine verschuivingen ondergaat, die ook afhangen van de aardrijkskundige ligging der waarnemingsplaats. Daarbij komt dan nog de lichtschijn, die men als 'aardlicht' bestempelt, en die zijn grootste lichtsterkte op ongeveer 15$^{o}$ boven de gezichteinder vertoont. En tenslotte de lichtverzwakking door de dampkring der Aarde, waardoor de lichtschijn dichter bij de kim in toenemende mate verzwakt wordt.

Als de wolk van kosmisch stof, die het zodiakaallicht vormt, zich in de vorm van een ring buiten de aardbaan moest bevinden, zouden wij aan de ene zijde de Gegenschein even helder moeten zien als aan de andere zijde het zodiakaallicht (fig. 153). Dat dit volstrekt niet uitkomt, bewijst afdoende dat de stofwolk zich hoofdzakelijk *binnen* de aardbaan bevindt: het zodiakaallicht

is het onder kleine hoeken verstrooide licht; de Gegenschein, het door de buitenste delen van de schijf terugverstrooide licht, dat bij niet te kleine stofdeeltjes altijd heel veel zwakker is (§ 183).

Men heeft beweerd,[1] dat het zodiakaallicht nu helderder, dan zwakker wordt, met een periode van 2 tot 3 minuten; deze wisselingen zouden min of meer overeenstemmen met storingen van de magneetnaald. Het licht zou vooral sterk zijn gedurende magnetische stormen. Eer we deze waarnemingen geloven, zou het goed zijn de realiteit der schommelingen vast te stellen, door tenminste twee waarnemers gelijktijdig en onafhankelijk van elkaar te laten observeren; ook dient met zekerheid uitgemaakt te worden, dat ze niet toe te schrijven zijn aan wolkensluiers of schaduwen van wolken.

Een zeer belang wekkende waarneming zou te doen zijn gedurende een totale zonsverduistering.[2] De mogelijkheid is n.l. niet uitgesloten, dat men dan de schaduwkegel der Maan zou kunnen zien strijken door de stoflagen welke het zodiakaallicht verstrooien. Hiertoe zou men natuurlijk moeten waarnemen op een tijd waarop de Zon al onder is.

Er schijnt ook iets als een maan-zodiakaallicht te bestaan, dat vóór de opgang en na de ondergang der Maan verschijnt. Het is echter tenminste even moeilijk waar te nemen als de Gegenschein.

## 202. Maansverduisteringen.[3]

Maansverduisteringen ontstaan, als de schaduw der Aarde over de Maan valt. Is het niet de moeite waard eens te kijken hoe onze schaduw er uit ziet? Op die wijze bekeken is zulk een maansverduistering eigenlijk een middel, om iets over onze eigen Aarde te vernemen!

Geen twee maansverduisteringen zien er gelijk uit. Slechts zelden is de Maan zo volledig verduisterd dat men ze in 't geheel niet meer ziet aan de nachthemel. In 't algemeen is de kleuring in 't midden der schaduw vaal koperrood, met daaromheen toenemend helderder tinten. Men onderscheidt:

1) Vgl. H. Stetson, Science, **70**, 635, 1929.
2) A.N. **121**, 37, 1889.
3) Freeman, Nat. **15**, 398, 1877. - H. Meyer-Bührer, A.N. **229**, 229, 1927. - W.J. Fisher, Smiths. misc. Coll. **76**, number 9, 1924. - W.J. Fisher, Science, **70**, 404, 1929.

het binnenste donkere gedeelte,

| | |
|---|---|
| 0-30' | roodachtig zwart, naar buiten toe helderder bruinachtig oranje, |
| 30'-41' | grauwe zoom van vrij gelijkmatige helderheid, |
| 41'-42' | overgangszoom. |

het buitenste heldere gedeelte; soms kan men waarnemen dat dit uit ringen bestaat, die achtereenvolgens helder zeegroen, bleek goudkleurig, koperkleurig, perzikbloesemrose getint zijn (van binnen naar buiten).

Deze kleuren en hun veranderlijkheid doen al vermoeden dat we hier niet zo maar met een gewone schaduw te maken hebben. En inderdaad! Bij nadere beschouwing blijkt, dat de schaduw van de aardbol zelf onmogelijk de Maan kan verduisteren, omdat de straalkromming in onze dampkring de stralen naar binnen buigt! ‘De schaduw van de Aarde’ is hier niets anders dan de stralenbundel die door de onderste lagen van onze dampkring is gegaan, tot een hoogte van een kilometer of 8, en die op zijn weg donkerrood is gekleurd; dit geschiedt op dezelfde wijze als bij de zonnestralen die ons bij de schemering dwars door een dikke dampkringslaag bereiken, alleen is de kleur nog doffer, omdat de lichtstralen nu een *dubbel* lange weg hebben doorlopen. De kleur van de centrale gedeelten der aardschaduw geeft dus een aanwijzing over de grotere of geringere doorzichtigheid van onze dampkring. Het is geen toeval dat de verduisterde Maan er erg donker uitziet op tijden dat er veel stof van vulkanische uitbarstingen in onze dampkring zweeft. Gemiddeld zijn de maaneklipsen ook donkerder, wanneer de Maan zich meer aan de Noordzijde van de aardschaduw dan wanneer ze zich aan de Zuidzijde bevindt: blijkbaar is er meer vulkaan- en woestijnstof in het noordelijk dan in het zuidelijk halfrond.

Om zich op eenvoudige wijze een oordeel te verschaffen over de helderheid ener maansverduistering, kan men gebruik maken van het eigenlijk zeer merkwaardige feit, dat ons oog bij geringe verlichtingssterkte geen fijnere bijzonderheden meer onderscheidt: in de schemering kunnen we de gewone letters van onze krant niet meer lezen, maar wel nog de grote opschriften. Zo moeten wij er hier op letten, of de grote vlakten (de zogenaamde ‘zeeën’) van het maansoppervlak, die zich gewoonlijk als grauwe vlekken aftekenen, ook gedurende de verduistering zichtbaar blijven:

*a.* voor het blote oog;
*b.* met een kijkertje van 5 tot 15 cm objektiefmiddellijn;
*c.* met een grotere kijker. Dit onderscheid is voldoende voor een ruwe verdeling der maansverduisteringen in: helder, gemiddeld, donker. Uit een stelselmatige vergelijking van dergelijke aantekeningen over een aantal jaren zal een heleboel merkwaardigs af te leiden zijn. (Merk op dat de kijker het beeld van een verlicht vlak niet helderder maakt, en dat de verhoogde zichtbaarheid dus alleen aan de optische vergroting te wijten is!).

## 203. Het asgrauwe licht.[1)]

Als de Maan bijna nieuw gaat worden of pas nieuw geweest is, zien we naast haar smalle sikkeltje het verdere maanoppervlak zwak verlicht (fig. 80). Dit ‘asgrauwe licht’ is afkomstig van de Aarde die als een heldere en grote lichtbron de Maan beschijnt. Het merkwaardige is nu, dat het asgrauwe licht niet altijd even sterk is. Soms is het bijna onzichtbaar, andere malen is het bijna melkwit, zo helder dat men er de donkerder vlekken in kan onderscheiden welke we gewoonlijk op het maansoppervlak zien. De veranderingen in de sterkte van het asgrauwe licht schrijft men toe aan het feit, dat de naar de Maan gekeerde helft der Aarde nu eens veel oceanen, dan eens veel vastelanden bevat, dat zij soms meer bewolkt, andere malen helderder is. Zo geeft een blik op het asgrauwe licht ons ineens een indruk van de toestand op een halfrond der Aarde! En in zoverre behoort de studie van het asgrauwe licht eigenlijk ook tot de natuurkunde van de Aardbol.

Schat de sterkte van het asgrauwe licht in een schaal van 1 tot 10 op een aantal dagen (1 = onzichtbaar, 5 = tamelijk goed zichtbaar, 10 = opvallend helder). U bemerkt weldra, dat de zichtbaarheid sterk afhangt van de schijngestalte van de Maan, omdat de heldere sikkel ons verblindt zodra hij breder wordt. Een vergelijking van de zichtbaarheid van het asgrauwe licht op verschillende dagen heeft dus slechts betekenis, als men *bij gelijke schijngestalte* vergelijkt. Daarentegen blijkt de hoogte boven de gezichteinder weinig invloed op de zichtbaarheid te hebben.

1) A.N. **196**, 269, 1913. - Die Himmelswelt, **34**, 95, 1924.

## Licht en kleur in het landschap.

### 204. De kleuren van Zon, Maan en sterren.[1)]

.... *Meermalen zien wij*
*Hoe zich verschillende kleuren over haar aanschijn verspreiden*:
*Blauwig verkondigt ze regen; en als ze rood is, de Oostwind*.

*Vergilius, Georg. I*, 443.

Het is moeilijk de kleur van de Zon te beoordelen, omdat haar schittering zo verblindend is. Toch komt het mij voor dat zij beslist *geel* is; samen met het licht van de blauwe lucht ontstaat dan het mengsel dat we 'wit' noemen: de kleur van een blad papier bij zonlicht en heldere hemel. Bij dergelijke waarderingen ontstaat de moeilijkheid tengevolge van het ietwat onbepaalde van het begrip 'wit': in het algemeen zijn we geneigd, de kleur die in onze omgeving overheerst als wit of tot wit naderend te bestempelen (vgl. § 95).

Op een bewolkte of mistige dag zijn de zonnestralen en de hemelstraling al gemengd door de talloze terugkaatsingen en brekingen tegen de waterdruppeltjes, en vertoont ons de lucht dus een witte mengkleur. Als we bedenken dat het blauwe licht van de lucht eigenlijk verstrooid licht is dat eerst in het zonlicht bevat was, moeten we besluiten dat de Zon, buiten de dampkring gezien, ook ongeveer wit zou zijn.

We weten reeds dat *oranje* of *rode* kleuren van de ondergaande Zon te verklaren zijn uit de snel toenemende lengte van de weg die haar stralen te doorlopen hebben vóór ze ons oog bereiken; langzamerhand zijn de sterker breekbare stralen bijna geheel verstrooid en blijven alleen de dieprode over (§ 172).

In zeldzame gevallen kan men de hoogstaande Zon door de nevel *koperrood* gekleurd zien, namelijk als de mistdruppeltjes zeer klein zijn en dus vooral de korte golven verstrooien (§ 183).

In andere gevallen is ze *blauwachtig*: men beweert dat dit vooral voorkomt wanneer de wolken een oranje zoom krijgen.

1) Fournet, C.R. **47**, 189, 1858. - Osthoff, Mitt. Ver. Fr. d. Astron. **10**, 136, 1901. - J. Plassmann, Met. Zs. **8**, 421, 1931.

Het is mogelijk dat de tegenstelling der kleuren hier een rol speelt, of dat ongeoefende waarnemers de kleuren van wolken in de onmiddellijke nabijheid van de Zon verwarren met de kleur der zonneschijf zelf. Geheel verschillend is het verschijnsel der *blauwe* zon, wanneer wij haar zien door een dichte wolk van zeer gelijkmatige druppeltjes (§ 164).

De Maan is in de dag opvallend *zuiver wit*, omdat dan het sterke blauw dat de hemel verstrooit opgeteld wordt bij haar eigen geelachtig licht; ook bij haar op- en ondergang is ze dan vrijwel kleurloos, mat, slechts een weinig geelachtig. Bij zonsondergang ziet men haar geleidelijk geler worden, naarmate het blauwe licht van de hemel verdwijnt; op een gegeven ogenblik is ze mooi *zuiver geel* geworden: waarschijnlijk lijkt de kleur ons sterker door het physiologische kontrast met de nog zwak blauwe achtergrond. Tegen het einde der schemering loopt de kleur weer terug naar *geelu it*; dit zal wel komen doordat de omgeving donkerder wordt, zodat het maanlicht voor ons oog zeer helder lijkt, en dan door een merkwaardige eigenschap van ons oog tot wit nadert, zoals alle zeer heldere lichtbronnen. 's Nachts blijft dan verder de Maan licht geelachtig, precies zoals de Zon bij dag; in zeer heldere winternachten, als ze heel hoog zit, nadert ze het meest tot wit; maar nabij de gezichteinder vertoont ze dezelfde *oranje* en *rode* tinten als de ondergaande Zon: dat de indruk van die kleuren op ons oog een weinig anders is, komt door de veel geringere lichtsterkte.

De volle Maan temidden der blauwe aardschaduw heeft een mooie, uitgesproken *bronsgele* tint, die zonder twijfel door complementaire tegenstelling met de omgeving ontstaat. En als zij omringd is door fel purperrood gekleurde wolkjes nadert haar tint tot *groengeel*. Worden de wolkjes zalmrood, dan nadert ze soms zelfs tot *blauwgroen*. Deze tegenstellingskleuren zijn nog duidelijker bij de maansikkel dan bij de volle Maan.

Niet te verwarren met de kleur van de Maan is de kleur van het landschap in de maneschijn, dat algemeen als blauw, groenblauw geldt. Stellig is dit voor een groot gedeelte het gevolg van tegenstelling met ons oranje kunstlicht; de blauwe kleur van de door de Maan verlichte hemel is daardoor des te opvallender.[1]

Om een eerste denkbeeld te krijgen van de kleurverschillen die de sterren kunnen vertonen[2], bekijken we de grote vierhoek

1) Hemel en Dampkring, **31**, 209 en 271, 1933.
2) C. Wirtz in R. Henseling: Astronomisches Handbuch (Stuttgart 1921). Bottlinger en Schrödinger in Naturwiss. **13**, 1925.

van het sterrebeeld Orion, en bemerken hoe Betelgeuze, de heldere ster *α* links boven, opvallend geel, ja zelfs oranje is vergeleken met de drie overige (fig. 62). Vlak bij dit sterrebeeld zit een andere oranje ster, Aldebaran van de Stier.

Nu komt het er op aan, zich niet met die eerste, heel gemakkelijke kleuronderscheiding te vergenoegen, maar fijnere tintverschillen na te speuren. Dit stelt hoge eisen aan onze kleurenzin, maar door oefening kan men het een heel eind brengen. Daar de kleuren der sterren te wijten zijn aan hun verschillende temperaturen, is het begrijpelijk dat ze dezelfde opeenvolging vertonen als een gloeiend lichaam dat men geleidelijk laat afkoelen: van *wit* over *geel* en *oranje* naar *rood*. Het is geen uitgemaakte zaak, of de heetste sterren reeds als *blauw* te beschrijven zijn, of veeleer als zuiver wit: blijkbaar hebben de verschillende waarnemers niet dezelfde opvatting van het eigenlijke ‘wit’; sommige ondervinden meer dan andere de invloed van de zwak-verlichte hemelachtergrond, die ons blauwachtig lijkt, en die wij toch als kleurloos gaan beschouwen, omdat het de gemiddelde kleur van het nachtelijk tafereel is.

De volgende schaal geeft een denkbeeld van de tintverschillen die onder de sterren voorkomen, met de getallen die daar gewoonlijk voor gebruikt worden en enkele voorbeelden. De schatting der kleur door individuele, goede waarnemers valt dikwijls een gehele klasse boven of onder de aangegeven gemiddelde; de hier gegeven schattingen zijn uitgevoerd door waarnemers die de blauwe tint niet als zodanig zagen, en dus geen negatieve trappen hadden.

| | | | |
|---|---|---|---|
| -2 | blauw | *α* van de Grote Hond (Sirius) | 0,8 |
| -1 | blauwachtig wit | *α* van de Lier (Wega) | 0,8 |
| 0 | wit | *α* van de Leeuw (Regulus) | 2,1 |
| 1 | geelachtig wit | *α* van de Kleine Hond (Procyon) | 2,4 |
| 2 | witgeel | *α* van de Arend (Altair) | 2,6 |
| 3 | lichtgeel | *α* van de Grote Beer | 4,9 |
| 4 | zuiver geel | *β* van de Grote Beer | 2,3 |
| 5 | diepgeel | *α* van de Kleine Beer | 3,8 |
| 6 | roodachtig geel | *β* van de Kleine Beer | 5,8 |
| 7 | oranje | *α* van de Boötes (Arcturus) | 4,5 |
| 8 | geelachtig rood | *α* van de Schorpioen (Antares) | 7,5 |
| 9 | rood | Venus | 3,5 |

| | |
|---|---|
| Mars | 7,6 |
| Jupiter | 3,6 |
| Saturnus | 4,8 |

Natuurlijk worden de sterren ook roodachtiger als ze dicht bij de gezichteinder komen, maar de fonkeling belet dan meestal het zuiver schatten van de kleur. Het is merkwaardig dat wij op aarde een gloeiend lichaam van 3000° als witgloeiend bestempelen, terwijl een ster van diezelfde temperatuur ons oranjerood schijnt! Waarschijnlijk is dit physiologische verschijnsel aan de veel geringere helderheid van de ster te wijten: de rode componente van de gezichtsindruk is nog waarneembaar, terwijl de groene en blauwe componenten de drempelwaarde niet meer bereiken.

*Nu is het nacht, de* **blauwe** *nacht met duizend sterren ....*

*P. Verlaine, Jadis et Naguère (Crimen Amoris).*

## 205. De kleuren der wolken.

Het is een genot om de mooie, zomerse stapelwolken te zien voorbijdrijven, en zich rekenschap te geven van de redenen waardoor bepaalde delen lichter, andere donkerder zijn. Waar de Zon de stapelwolken beschijnt, zijn ze schitterend wit; maar ze worden grauw of donkergrijs als wij ze boven ons hoofd zien voorbijtrekken en wij de beschaduwde onderkanten zien. De waterdruppeltjes zijn zo dicht, dat het licht, nauwelijks in de wolk gedrongen, er al voor een groot gedeelte door de vele terugkaatsingen weer uitkomt; de wolk vertoont zich vrijwel als een ondoorzichtig wit lichaam. Zitten stapelwolken vóór de Zon, dan zien zij er donker uit, maar ze zijn omzoomd door een rand van licht: '*elke wolk heeft een zilveren omranding*'. De verdeling van licht en schaduw geeft ons dus belangwekkende inlichtingen omtrent wat vóór en achter, onder en boven is, en welke de ware vormen zijn van de wolkengevaarten in de ruimte. Het is niet altijd gemakkelijk zich die verhoudingen goed voor te stellen, en de plaats van de Zon op de juiste wijze in rekening te brengen. Als er bijvoorbeeld vóór mij wolken zijn, en de Zon een eind daarboven, verwonder ik er mij over dat ik bijna alleen schaduw zie (fig. 154*a*); ik heb niet voldoende het gevoel van de ontzaglijk grote afstand der Zon, ik stel ze mij onbewust tamelijk dichtbij vóór en verwacht licht op AB (154*b*), inplaats van te bedenken dat de zonnestralen die de wolk beschijnen evenwijdig zijn aan de lijn van de Zon naar mijn oog (154*c*).

Hoe verrassend het spel van licht en donker over de wolken-

massa's ook zij, hoe ingewikkeld de schaduwen die ze op elkaar werpen, toch lijkt het wel onmogelijk daarmee al de tintverschillen van de stapelwolken te verklaren.[1) ] Als er bij opklarend weer maar een paar stapelwolkjes meer overblijven, die fel door de Zon beschenen worden, en onmogelijk schaduw op elkaar kunnen werpen, ziet men dikwijls hoe ze donkerder en donkerder worden en tenslotte blauwzwart op het ogenblik dat ze gaan verdwijnen. In het algemeen maakt het de indruk dat ijle delen van stapelwolken

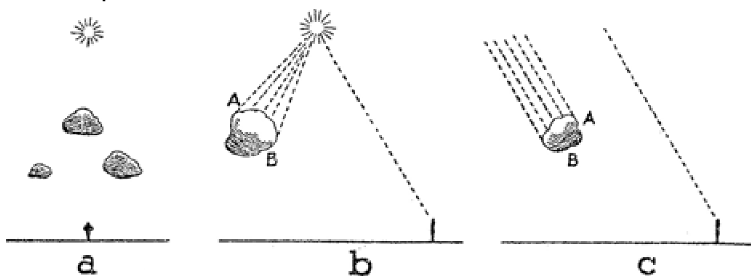



Fig. 154. Licht en schaduw op stapelwolken.
*a*. Het landschap en de waarnemer, gezien van N. naar Z. *b*. Verkeerde subjektieve voorstelling en verwachting. *c*. Werkelijke verhoudingen. (In *b* en *c* is het landschap gezien van Oost naar West).

tegen de blauwe lucht niet een tint vertonen, bestaande uit blauw + wit (zoals men zou verwachten), maar uit blauw + zwart!

In andere gevallen is een stapelwolk grijs, terwijl wij ze zien tegen de achtergrond van een andere die felwit is: in dit geval is dan toch zeker niet waar dat de helderheid eenvoudig met de totale laagdikte zou toenemen. De optika van deze verschijnselen, die we elke dag om ons heen kunnen waarnemen, is nog zeer onvoldoende onderzocht. Zeker moet men wel heel voorzichtig zijn vooraleer aan te nemen dat de wolken het licht echt kunnen *opslorpen*; men moet zolang mogelijk alles trachten te verklaren alsof het vaste witte voorwerpen waren, of verstrooiende nevels, die echter ook donker stof kunnen bevatten.

Belangwekkend is een vergelijking met de witte stoom van een lokomotief (geen rook!). In een bepaald geval zag deze er lichter

1) C.R. **177**, 515, 1923.

uit, als men onder een grote hoek met het invallende licht waarnam; minder licht als men van uit de richting van de Zon waarnam, en de lichtstralen in het oog kreeg die ongeveer volgens de invalsrichting terugkeerden. In andere gevallen was de stoom van alle richtingen uit veel helderder dan de helderste delen der stapelwolken; dit was waarschijnlijk te wijten aan de grote afstand der stapelwolken, en de lichtverzwakking door verstrooiing van de lucht.

Donkere stapelwolken op grote afstand zien er dikwijls blauwachtig uit. Dat is niet de kleur van de wolk zelf, maar het verstrooide licht dat ons bereikt van de dampkringslucht tussen de wolk en ons oog. Naarmate zulk een donkere wolk verder van ons verwijderd is, moet haar tint aldus meer en meer naderen tot die van de achtergrond van de hemel. - Heldere wolken laag bij de gezichteinder krijgen daarentegen een geelachtige tint (§ 173).

Wij zouden ons onderzoek nog moeten uitbreiden tot de andere wolkentypen, en trachten te verklaren waarom bijvoorbeeld de regenwolken zo grauw zijn, waarom de donderkoppen eigenaardige loodkleuren naast een vaal oranje kunnen vertonen (stof?). Van al deze dingen is echter zo weinig goed bekend, dat we liever den lezer willen opwekken tot zelfstandig onderzoek.

De lichtverdeling over het uitspansel, bij volmaakt gelijkmatig betrokken lucht, is zeer kenmerkend en vormt een tegenhanger van de lichtverdeling bij helderblauwe lucht. Vergelijk bijvoorbeeld met behulp van een spiegeltje het zenith en de gezichteinder: deze laatste is altijd het helderst, de verhouding is 0,50 tot 0,80 (Plaat XI).

## 206. De kleuren der wolken bij zonsopgang en zonsondergang.

Bij het beschrijven van de zonsondergang hebben we eerst de wolken weggedacht. We willen ons nu afvragen hoe de wonderbare wolkentaferelen tot stand komen met hun oneindig rijke kleurenpracht en vormenwisseling, die aan elke regelmaat schijnen te ontsnappen. Dit zij vooropgesteld: het gaat hier in hoofdzaak om hetgeen te zien is *vóór* de Zon ondergaat, terwijl de eigenlijke ‘schemeringsverschijnselen’ daarna in § 189 besproken zijn. Zodra de Zon ondergegaan is, is de wolkenpracht eigenlijk verdwenen.

Kort vóór zonsondergang worden de wolken bestraald:

1. door rechtstreeks zonlicht, langzamerhand meer en meer geel, oranje, rood gekleurd naarmate de Zon daalt;

2. door licht van de hemel, oranjerood aan de zonzijde, overal elders blauw; dit oranjerode licht is te wijten aan de sterke verstrooiing van de grote stofdeeltjes en waterdruppeltjes, die de stralen maar weinig doen afwijken (§ 183 en 192); het blauwe

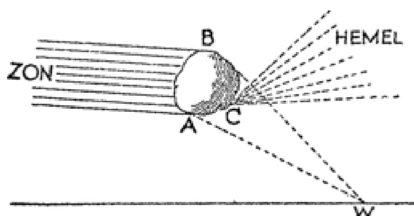



Fig. 155. De verlichting van een wolk kort vóór zonsondergang.

licht is door de terugverstrooiing der luchtmolekulen ontstaan.

Stel u nu een wolk voor in de buurt van de Zon, eerst heel ijl, dan geleidelijk dichter wordend. Haar druppeltjes verstrooien het licht over kleine hoeken; ijle wolkensluiers zullen ons dus wel veel licht toezenden van de Zon die schuin achter hen zit; hoe meer verstrooiende deeltjes, hoe sterker het warme, oranje-rose licht. Maar er komt een 'optimum': als de lagen tè dicht worden of tè dik, kan het licht er niet goed meer doorheen; zware wolken laten bijna niets door, en kaatsen alleen naar ons terug het licht van het blauw gebleven deel van de hemel, waardoor zij van onze zijde verlicht worden (fig. 155, C). Een mooie zonsondergang zal dus vooral te verwachten zijn *bij ijle wolken of bij gebroken lucht*.

*Aan de zijde van de ondergaande Zon zien we ijle wolken in doorvallend licht, dichtere of dikkere wolken in opvallend licht*; *de eerste zijn helder oranjerood, de tweede van een donkerder grijsblauw*. Deze tegenstelling van kleur, die dikwijls een verschil in vorm en bouw begeleidt, is een van de verrukkelijkste trekken dezer wolkentaferelen.

*De wolken liggen in lagen*
*Van balken op balken gespreid*,
*Met gouden beslag beslagen*,
*En blauwe belegsels beleid*.

*René de Clercq, Dageraad*.

De randen van de zware, blauwgrijze wolken zijn volgens deze regel prachtig met goud omzoomd. Merk op: de rand A, naar de Zon toe gekeerd, geeft sterker licht dan de rand B; want:

1. daar is de afwijkingshoek der lichtstralen het kleinst;

2. als we de wolk als een rolrond voorwerp denken, ziet

men dat we aan de zijde der Zon een strookje moeten waarnemen dat nog rechtstreeks belicht wordt (fig. 155).

De wolken die veel verder van de Zon verwijderd zijn, vertonen niet die mooie verstrooiing aan de randen; ze zijn echter aan de ene zijde rechtstreeks belicht, en krijgen aan de andere verstrooid blauw licht, zodat ook daar een kleurenspel ontstaat van oranje en blauw. Bij lager dalende Zon worden de kleuren steeds warmer, tot de wolken tegenover haar in het Oosten het purper van de tegenschemering vertonen.

Als de Zon nu ondergaat, trekt zich haar gloed geleidelijk terug van de verschillende delen van de hemel; de hoge wolkjes blijven het langst belicht. Dit wordt nu weer een fraaie tegenstelling, aangezien we naast en achter elkaar de wolkjes zien die nog zonlicht krijgen, en die welke alleen licht van de hemel ontvangen.

## 207. De faktoren die de kleur van het water bepalen[1].

Oneindig veranderlijk, door onvatbare schakeringen gemarmerd, in elke rimpeling weer anders - door zijn verfijnde samengesteldheid een eeuwige vreugde voor het oog ....

Laten we trachten te ontleden!

1. Een gedeelte van het licht dat we van het water toegezonden krijgen is aan de oppervlakte teruggekaatst. Zolang dit oppervlak glad is, werkt het als een spiegel, en het water kleurt zich blauw, grijs of groen naarmate de hemel helder is of zwaarbewolkt, of de zacht hellende oevers met gras bedekt zijn. Rimpelt zich het oppervlak, dan worden de tinten van hemel en oevers dooreengemengd, sprankels van het éne spatten over het andere. Bij sterke golving weerkaatst het water eenvoudig een mengkleur.

*Wat wij gemeenlijk als een oppervlak van eenvormige kleur beschouwen, is inderdaad geschakeerd met een oneindige verscheidenheid van tinten, die dikwijls uitlopers zijn van anders gekleurde vlakken op enige afstand* (*zoals men het weerspiegelde zonnebeeld tot een grote lichtvlek uitgebreid ziet*). *Bij het waarnemen van de glans, de zuiverheid en de oppervlakte zelf, speelt ons gevoel voor die veelvuldige tinten geen kleine rol, terwijl de voortdurende bewegelijkheid van dat oppervlak ons belet ze te ontleden of te begrijpen hoe ze eigenlijk ontstaan.*
*Ruskin, Modern Painters, III, 507.*

1) Uitgebreide literatuur! Samenvatting van het oudere werk bij W.D. Bancroft, Chem. News **118**, 197, 1919. of Journ. Frankl. Instit. **187** no. 3. - v. Aufsess, Ann. d. Phys. **13**, 678, 1904. - C.V. Raman, Proc. R. Soc. **101**. 64, 1922. - Raman, Nat. **110**, 280, 1922. - Sjoelejkin, Phys. Rev. **22**, 85, 1923. - K.R. Ramanathan, Phil. Mag. **46**, 543, 1925.

2. Een ander gedeelte van het licht is in het water zelf doorgedrongen, en is daar terugverstrooid tegen stofdeeltjes en troebeling. Meestal zijn die stofjes zo groot, dat ze alle stralen even sterk verstrooien, en dat het terugkerende licht dezelfde kleur heeft als het invallende; bestaan ze uit zand of klei, dan kan het terugkerende licht een bruine tint vertonen[1)]. In zeer diep en zuiver water echter wordt een merkbaar gedeelte van het licht terugverstrooid door *de watermolekulen* zelf, met de heerlijk blauwe kleur die de hemel en een dik blok gletscherijs vertonen.
3. Tenslotte is er in ondiep water altijd een deel van het licht dat de bodem bereikt en daar diffuus teruggekaatst wordt, terwijl het de kleur van die bodem aanneemt.
4. Op hun weg door het water worden de lichtstralen voortdurend gewijzigd.

*a.* door *verstrooiing* verliezen ze een deel van hun sterkte; in zuiver water worden vooral de violette en blauwe stralen verzwakt (§ 171);
*b.* door de *echte absorptie* van het water, die in lagen van enige meters dikte al zeer merkbaar is, verliezen ze hun gele, oranje en rode stralen, geheel op de wijze van licht dat door gekleurd glas gaat;
*c.* een deel der blauwe en violette stralen in bepaalde delen van de zee schijnt door *fluorescentie* omgezet te worden in groene: de fluorescerende stof is wellicht een organische zelfstandigheid, die in de zee in voldoende concentratie voorkomt om een belangrijke rol te spelen (vgl. § 230).

Verstrooiing is er altijd in het water, zelfs in het allerzuiverste: want de watermolekulen zelf liggen ongelijk dicht verspreid, hetgeen een ongelijkmatigheid, een zekere 'gekorreldheid' veroorzaakt; daar komt nog bij, dat ieder watermolekuul zelf nog van de bolvorm afwijkt. Deze verstrooiing is volmaakt te vergelijken met de verstrooiing van de lucht, en neemt ook toe met $1 / \lambda^4$: zij is dus het grootst voor de blauwe en violette stralen. In minder zuiver water zijn er zwevende deeltjes; zijn die uiterst klein, dan voegt hun werking zich bij die van de molekulen en veroorzaken zij een blauwviolette verstrooiing, zijn ze groter dan 0,001 mm bijvoorbeeld, dan verstrooien ze alle kleuren gelijkelijk, en wel vooral in voorwaartse richting (§ 183).

Een goed voorbeeld van een vloeistof met zeer kleine verstrooiende deeltjes is gewoon zeepwater; in opvallend licht gezien

1) Sjoelejkin, Phys. Rev. **22**, 85, 1923.

tegen een donkere achtergrond lijkt het blauwig; daarentegen is het oranje in doorvallend licht (vgl. § 171).

De absorptie van het water der meren en rivieren is in hoofdzaak toe te schrijven aan ijzerverbindingen ($Fe^{+++}$ -ion) en aan organische humuszuren. Bij concentraties van 1:20 miljoen ijzer en 1:10 miljoen humuszuur, zoals die in de natuur voorkomen, moest het water eigenlijk veel sterker gekleurd zijn dan het is; het schijnt, dat de $Fe^{+++}$ -verbindingen het humuszuur oxyderen onder de invloed van 't licht en zelf in $Fe^{++}$-verbindingen overgaan, $Fe^{++}$ neemt weer zuurstof op en wordt $Fe^{+++}$; enz.

Wij zullen nu aan enige voorbeelden laten zien, hoe deze verschillende faktoren samenwerken om de kleur van het water te bepalen.

## 208. De kleur van de plassen langs de weg.

Een eenvoudig geval is dat van de plassen die de regen zo dikwijls langs de weg maakt. Als we onder een grote invalshoek kijken, is de terugkaatsing aan het oppervlak bijna volmaakt, we zien de gespiegelde voorwerpen mooi kontrastrijk, de zwarte takken zien er mooi donker uit. Komen we dichterbij, zodat onze blik steiler en steiler invalt, dan wordt de terugkaatsing veel zwakker (§ 52); het is nu, alsof er over alles een gelijkmatig waas werd uitgespreid, alle kleuren zijn bleker geworden; we zien vooral, dat de donkere partijen niet echt donker meer zijn, maar grijs. Dat waas is afkomstig van licht, dat van alle kanten op de waterplas invalt, in het water dringt, en in alle richtingen verstrooid wordt; is het water van de plassen melkachtig troebel, dan gebeurt die verstrooiing door de zwevende stofdeeltjes; is het water troebel maar bijvoorbeeld door blauwsel gekleurd, dan heeft het verstrooide licht een blauwe kleur gekregen, en voegt zich die tint bij de weerspiegelde beelden; is het water helder maar de bodem licht (plassen zeewater op het strand!), dan krijgen alle weerspiegelde beelden een zandkleur en ziet men onder steile hoeken bijna alleen de bodem met nog enkele der helderste weerspiegelingen. Slechts bij helder water en donkere bodem blijven de teruggekaatste beelden ook bij steile invalshoek zuiver en kontrastrijk, hoewel lichtzwakker. In zulke donkere, zeer rustige plassen krijgt het groen der bossen soms een zuiverheid van tinten en een scherpte van beelden, groter dan bij de gespiegelde voorwerpen zelf! Dit is een psychologisch effekt, in hoofdzaak

toe te schrijven aan de geringere verblinding door het omgevende landschap (§ 7).
Laat een helper op verschillende afstanden van de plas staan, en kijk hoe zijn spiegelbeeld verandert! Vooral aan het strand is de proef zeer treffend.
We zien hier als 't ware aan een verkleind model toegelicht, hoe de zichtbaarheid van voorwerpen onder de zeespiegel (klippen, duikboten) groter kan zijn, gezien van uit een vliegtuig dan van uit een schip.

> *Feitelijk is er nauwelijks een plas langs de weg te vinden, die niet evenveel landschap in zich als om zich heeft. Die plas is niet het bruine, modderige, lelijke ding dat we denken dat hij is; hij heeft een hart evenals wijzelf, en op zijn bodem zijn de takken der hoge bomen, en de blaadjes van het trillende gras, en alle soorten tinten van wisselend mooi licht van de hemel.*
>
> *Ruskin, Modern Painters, III*, 496.

### 209. De kleur van onze binnenwateren.

De rimpelingen aan de oppervlakte geven een altijd wisselende verscheidenheid van licht en kleur aan elke singel, aan elke sloot (§ 14-18). Om na te gaan of een bepaald gedeelte van het oppervlak gerimpeld is, moeten we 't van uit verschillende richtingen bekijken; zwakke rimpels worden alleen zichtbaar *aan de grens van heldere en donkere spiegelbeelden*, de spiegeling van de effen blauwe lucht vertoont ze niet, evenmin als de donkere massa van zwaar geboomte (Plaat XIII). Sterke rimpels geven aan de lichtstralen zulke sterke afwijkingen, dat ze ook in vrij grote effen gebieden een arcering van schaduw of licht brengen die uit geheel andere richtingen afkomstig zijn; of doordat de terugkaatsingscoëfficiënt tegen de vóór- en de achterzijde van de golfjes merkbaar gaat verschillen (blz. 299).
Door dergelijke waarnemingen bevinden we, dat bijna altijd de gerimpelde en de ongerimpelde delen van een wateroppervlak verrassend scherp begrensd zijn. En dit is niet te wijten aan ongelijkmatige verdeling van de windstromingen: juist bij regen bijvoorbeeld, als het gehele watervlak gelijkmatig aan het trillen wordt gebracht, verschijnen die grenzen met volkomen duidelijkheid. De oorzaak is niets anders dan *de aanwezigheid van een uiterst dun olielaagje*, nog geen miljoenste millimeter dik (= 2 oliemolekulen!), dat toch reeds voldoende is om de rimpelingen

te dempen die door wind of regen veroorzaakt worden. Het is te wijten aan dierlijke en plantaardige overblijfselen, aan sporen afgewerkte olie in het kielwater van schepen, aan de afval in het rioolwater. De wind blaast dit laagje voor zich uit, en verzamelt het aan één kant van de singel; u zult altijd opmerken dat het water rimpels vertoont aan de kant vanwaar de wind komt, en effen is bij de oever daartegenover. In het effen gedeelte drijven takjes, blaadjes, maar verschuiven bijna niet ten opzichte van elkaar: ze zitten vast in het oliehuidje!

We verkrijgen aldus een geheel begrijpelijke verklaring voor het treffende verschil tussen het bewegelijke, sprankelende wateroppervlak van de beek in het bos, en tussen de loodkleurige, stroopachtige wateren in de achterbuurten ener grote stad.

Na de waarneming van de lichtverschijnselen aan de oppervlakte, willen we nagaan hoe deze weerspiegeling voortdurend wedijvert met het licht dat uit de diepte komt. We staan bij de oever onder 't geboomte. Hier en daar zien we de donkere boomkruinen weerspiegeld, en daartussen heldere stukken blauwe lucht. Waar de heldere hemel teruggekaatst wordt zien we de bodem niet, want het licht dat van de diepte komt is in verhouding te zwak. Waar de donkere bomen weerspiegeld worden zien we een mengsel van de kleur van hun gebladerte, de kleur van de bodem, en het diffuse licht dat door de stofjes in het water terugverstrooid wordt. - Bemerk, dat wij alleen dicht bij de oever iets van de bodem kunnen zien. Op enige afstand lukt dat niet meer, ook al zou de diepte niet veel toenemen; want het weerspiegelde licht wordt veel sterker bij grote invalshoek, en overheerst ten opzichte van het licht dat uit de diepte komt.

De donkere kiel van een boot wordt met een groenachtige waterkleur teruggekaatst; maar een helderwitte band die langs de boot loopt blijft gewoon wit.

‘In 't zonlicht is de plaatselijke kleur van het water meestal sterk en zeer werkzaam, en (zoals we hebben gezien) heeft ze invloed op alle donkere weerspiegelingen en vermindert hun diepte. In de schaduw echter neemt het terugkaatsend vermogen van water aanzienlijk toe,[1)] en meestal zal men bevinden

1) ‘Ik stel dit eenvoudig als een feit; ik ben niet in staat de reden ervan uit de beginselen van de optika af te leiden’. - De verklaring van den natuurkundige: het terugkaatsend vermogen is *precies hetzelfde* in de schaduw als in het licht, maar de verhouding teruggekaatst/diffuus verstrooid is kleiner in de zon, groter in de schaduw.

dat de vormen der schaduwen niet bepaald worden door ware beschaduwing van het oppervlak, maar doordat op die plaatsen de weerspiegeling der dingen zuiverder is.'

'Een zeer modderige rivier heeft in de zonneschijn een eigen gele kleur, waardoor alle terugkaatsingen vaal en zwak gemaakt worden. Maar in de schemering krijgt ze haar terugkaatsend vermogen geheel en al terug, en men ziet de bergen even duidelijk weerspiegeld als in een kristalhelder meer.'[1)]

*Ruskin, Modern Painters, III*, 505.

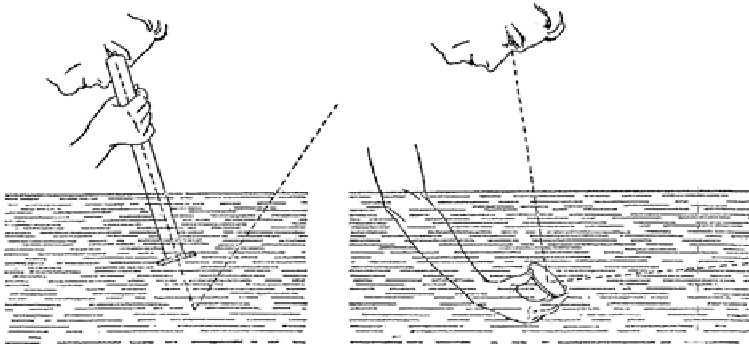


Fig. 156. Het waarnemen van de kleur van het water zonder dat de terugkaatsing aan het oppervlak stoort.

Er zijn enkele eenvoudige middelen, om de terugkaatsing aan het oppervlak te elimineren.

*a*. Houd een zwarte paraplu boven uw hoofd.

*b*. Neem een spiegeltje en dompel dat onder water (fig. 156); houd het onder verschillende hellingen, en beoordeel aldus de kleur van het licht dat van buiten in het water dringt en een zekere weg door het water heeft afgelegd.[2)] Als u de proef neemt in een willekeurige sloot, zult u de geelachtige kleur van het licht waarnemen, die aan echte absorptie toe te schrijven is. In zeer ondiep water is het al voldoende een witte scherf op de bodem te laten vallen of er een wit papier in te duwen. - In de zee gebruikt men voor een dergelijk doel een witte schijf, die op een zekere

1) Onze verklaring: sterk eenzijdige belichting in de schemering, zodat het algemene diffuse licht bijna verdwenen is dat in de dag van alle kanten invalt, verstrooid wordt, en zich op alle spiegelbeelden superponeert.

2) Wittstein, Ann. d. Phys. **45**, 474, 1858.



PLAAT XIII.
De golvingen in een wateroppervlak komen alleen te voorschijn nabij de grens van donkere en lichte spiegelbeelden.

diepte wordt neergelaten; maar dit behoort niet meer tot de *eenvoudige* proeven.

*c.* Gebruik een *waterkijker*: eenvoudig een buis van blik, zo mogelijk voorzien van een er op gekit ruitje (fig. 156). Hiermee beoordeelt u de kleur van het licht, dat van uit de diepte terugkeert door verstrooiing van de bodem of van de zwevende stofdeeltjes. Vooral te gebruiken als men baadt. Op ouderwetse schepen vindt men nog wel een zekere gelegenheid, waar de opening vertikaal in het water uitkomt: dit is een echte waterkijker op grote schaal!

*d.* Kijk door een nicol, zo gericht dat hij het teruggekaatste licht uitdooft (§ 214).

## 210. De kleur van de zee.

De terugkaatsing is de grote faktor die in 't algemeen de kleur van de zee bepaalt. Maar die terugkaatsing is oneindig verscheiden van aard, omdat het oppervlak van de zee een bewegend, levend ding is, dat zich rimpelt en golft al naar de wind en de strandvorm. Hoofdregel: alle spiegelbeelden in de verte zijn naar de horizon toe verschoven, doordat we tegen de hellende kanten der verre golfjes aan kijken (§ 16). De kleur der zee in de verte is dus ongeveer die van de hemel op $20^{\circ}$ tot $30^{\circ}$ hoogte, dus donkerder dan de hemel vlak boven de kim (§ 176); en dit des te meer, omdat slechts een gedeelte van het licht teruggekaatst wordt.

Daarnaast heeft de zee echter ‘een eigen kleur’: de kleur van het licht, dat uit de diepte terugverstrooid wordt. Van een optisch standpunt is kenmerkend voor de zee dat zij in 't algemeen *diep* is, zo diep dat er praktisch geen licht van de bodem terugkeert. *De eigen kleur van de zee is dus te wijten aan de samenwerking van verstrooiing en absorptie in de watermassa*. Een zee die alleen verstrooit zou er (afgezien van de terugkaatsing) melkwit uitzien, want alle stralen die er in dringen moeten er tenslotte ook weer uit. Een zee die alleen absorbeert zou zwart als inkt zijn: want dan keren de stralen slechts terug als ze de bodem bereikt hebben, en op die zeer lange weg is de geringste absorptie al voldoende om ze uit te doven. Bij samenwerking van verstrooiing en absorptie echter ontstaat de kleur: de lichtsoorten die weinig verstrooid worden dringen het diepste in het water door, eer ze terugverstrooid worden, en op die langere weg worden ze het sterkst door de absorptie verzwakt. In grote trekken kan men zeggen dat de lichthoeveelheid die uit de diepte terugkeert des

te groter wordt, naarmate de breuk *verstrooiingscoëfficiënt/absorptiecoëfficiënt* toeneemt. De volledige theorie is echter ingewikkeld.

Een rechtstreekse invloed van de bodem op de kleur van het waterveld is in onze zeeën niet waar te nemen, althans zodra zij meer dan een meter diep zijn. Ruskin beweert,[1] dat de bodem op 100 m diepte nog merkbaar tot de kleur der zee bijdraagt; en dergelijke beweringen hoort men van veel zeelui. De waarheid is, dat een plaatselijke verheffing van de bodem daar ter plaatse de golfslag en de rimpeling van het water wijzigt; terwijl er daar ook allicht meer vaste deeltjes opgewerveld worden dan in diepe zee, zodat de verstrooiing toeneemt. De bodem heeft dus wel invloed, maar niet rechtstreeks.

## 211. Licht en kleur over de Noordzee.

### 1. *Wind stilte, blauwe lucht*.

Een spiegelgladde zee in ochtendrust. De hemel blauw, overal blauw, maar nevelig. Alleen vlak vóór ons aan 't strand krult af en toe een smal golfje en tekent zich een schuimrandje af, dat even fluistert, en wegsterft. Het is zo stil ....

We staan op de dijk. Het zee-oppervlak ligt vóór ons als een landkaart. Een gedeelte is zò effen, dat het de zuivere weerspiegeling van de blauwgrijze hemel erboven vertoont, onverschoven, zoals een meer dat kan doen. Andere gebieden zijn ook blauwgrijs, maar hebben een donkerder toon; ze zijn duidelijk begrensd, hun verdeling is zo overzichtelijk, dat men ze onwillekeurig gaat tekenen. Maar na betrekkelijk korte tijd blijkt al, dat ze zich geheel verplaatst hebben. De lichter gekleurde gebieden kunnen dus geen ‘zandbanken’ zijn, zoals de badgasten gewoonlijk weten te vertellen; zij ontstaan, doordat er een onzichtbaar, uiterst dun oliehuidje over het zee-oppervlak uitgespreid is, zoals wij dat reeds in sloten en singels hebben opgemerkt (§ 209), en dat voldoende is om de rimpelingen te dempen.[2] Dergelijke olielaagjes zijn hier vermoedelijk afkomstig van het kielwater van schepen, of van stookolie die zij hebben geloosd. Waar het oliehuidje ontbreekt, vertoont het water lichte rimpelingen, - hetgeen ook later op de dag zal blijken, als de

1) Modern Painters, III, blz. 304.
2) Rechtstreekse meting toont aan, dat in die gebieden de oppervlaktespanning van het zeewater abnormaal gering is (Sjoelejkin, C.R. Leningrad 1, 494, 1935).

Zon over de zee staat, en de gerimpelde gebieden doet schitteren als een zee van licht. - Nu vertonen deze gebieden een donkerder kleur, 1. doordat de voorkant van elk rimpeltje een hoger, dus dieper blauw gekleurd deel van de hemel terugkaatst; en 2. doordat die terugkaatsing minder rakelings gebeurt, dus minder lichtsterk is. Met een nicol, waarvan de trillingsrichting vertikaal staat, ziet men de donkerder gebieden *veel* donkerder, het onderscheid met de lichte gebieden wordt sprekender. - Dat de grenzen tussen de verschillende gebieden vrijwel overal evenwijdig aan de kust schijnen te lopen, is een gevolg van de perspektivische

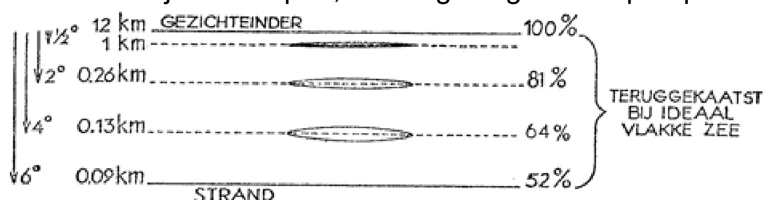



Fig. 157. De zee, gezien van op een 9 m hoge dijk. De ellipsen stellen voor, hoe een cirkel op verschillende punten van het zee-oppervlak perspektivisch verkort lijkt.

verkorting; in werkelijkheid kunnen de oliegebieden allerlei vormen hebben (fig. 157). Een paar werkelijke zandbanken tekenen zich af door een iets geler tint, maar alleen als de zee er uiterst ondiep is, bijvoorbeeld 10 of 20 cm.

Na de middag wordt gebaad, en dan blijkt hoe ongewoon helder het water van die rustige zee is; tot een meter diepte zien we alle bijzonderheden van de bodem, en zelfs heel kleine zwemmende dieren. Er zweeft weinig of geen zand in het water; alleen waar een golfje net gaat breken wervelen aan de achterkant kleine zandwolkjes op. Als we vlak bij ons op het water neerkijken, hindert de terugkaatsing van de hemel weinig of niet, en zien we op een diepte van 20 cm het gelige zand van de bodem. Gaan we tot een diepte van 1 m of 1,50 m, dan gaat de kleur over in een verrukkelijk groen; we voegen onze handen tot een kokertje bijeen, dat ons als een waterkijker dient om de terugkaatsing van de hemel te vermijden (§ 209). Dit groen is de kleur van het licht, dat in het water gedrongen en terugverstrooid is. - Zodra we echter naar het zee-oppervlak iets verder van ons kijken, overweegt de terugkaatsing en weerspiegelt alles de

blauwe lucht. Een kleurenspel van zeegroen en hemelsblauw!

'S Avonds gaat de Zon onder achter een blauwgrijze wolkenbank van enkele graden hoogte. Daarboven stralen de oranje en gele kleuren van de schemering, die hoger geleidelijk in het donkerder avondblauw van de hemel overgaan. De zee is nog even rustig gebleven en weerspiegelt zonder verschuiving het hele tafereel; maar doordat we nu naar 't Westen kijken komen de kleinste rimpelingen te voorschijn (§ 17): in het gedeelte van de zee dat het verst van ons af is, waar de blauwgrijze wolkenbank weerspiegeld wordt, tekent ieder rimpeltje een oranjegeel lijntje (de hellende golf weerspiegelt een hoger deel van de lucht). En dichterbij ons, waar de zee oranjegeel is, loopt er een donkerder arcering door: de weerspiegeling van weer hogere, blauwere lucht. Naar het NW en ZW, waar de schemeringskleuren verdwijnen en wij niet meer loodrecht op de golfjes kijken, weerspiegelt de zee zuiver de eenvormige wolkenbank, onveranderd van tint en helderheid, zodat de kimlijn verdwijnt, en zee en lucht ineensmelten, terwijl de zeilboten in de verte schijnen te zweven in een blauwgrijze oneindigheid. - Op een volgende avond, bij ongeveer gelijke weertoestand en wellicht nog minder wind, waren ook 's avonds de gebieden zichtbaar die met een oliehuidje bedekt waren: zij weerspiegelden de blauwgrijze wolkenbank, terwijl de gerimpelde gebieden door verschuiving de oranjegele lucht terugkaatsten.

### 2. *Zwakke wind, helderblauwe lucht met enkele afzonderlijke wolkjes*.

Ik ben nog niet op de dijk, of ik wordt al getroffen door de felle tegenstelling tussen de zwartblauwe zee en de lichte lucht bij de kim. Het zicht is buitengewoon goed, ragscherp tekenen de kim en de verre voorwerpen zich af, en deze toestand blijft de hele dag heersen. Er is enige westenwind, de brandingsgolven omzomen de kust met twee of drie rijen schuim, maar in volle zee is er geen schuim te zien. - We vatten post op de dijk.

Bekijk de afzonderlijke brandingsgolven die zich bij het strand vormen (fig. 158). De voorkant is donker geel-groen-grijs, want onze blik dringt steil in de voorste helling van de golf binnen, we krijgen dus weinig teruggekaatst licht, en dan nog van een donker stuk van de hemel; wel zien we het geelgroene licht dat terugverstrooid uit de diepte der zee komt, of dat door de achterkant van de golf is binnengedrongen en nu aan de voorkant uittreedt: maar dat is eigenlijk heel zwak, de voorkanten van de

golven zijn donker. Daarentegen weerspiegelt de achterkant de bleekblauwe hemel bij de kim. Zo vertoont elke golf een mooie tegenstelling tussen de donkergeelgroene voorkant en de lichtblauwe achterkant. Deze achterkanten zetten zich tussen de brandingsgolven voort in brede, weinig gerimpelde en goed spiegelende vlakke valleien, die insgelijks lichtblauw zijn. De twee of drie rijen zandbanken, die zich langs onze kust uitstrekken, zijn ieder duidelijk te herkennen aan hun brandingsgolf, terwijl de

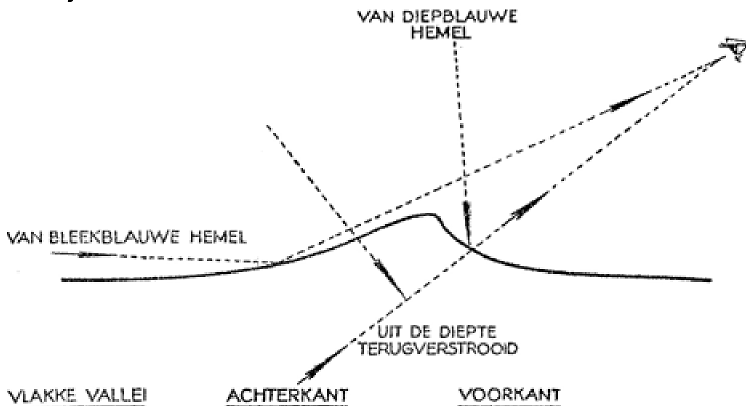


Fig. 158. Het ontstaan der verschillende kleuren bij een golf van de zee.

tussenruimten gladder en rustiger zijn. Verder van het strand af wordt de arcering der golfjes fijner en fijner. Er zijn geen brandingsgolven meer, maar de tegenstelling tussen de voorste en de achterste helling blijft bestaan. Doordat we meer rakelings over het water kijken, zien we de valleien tussen de golfjes niet meer, en tenslotte verdwijnen de achterkanten geheel; de voorkanten zijn veel minder steil, en weerspiegelen nu voornamelijk de hemel op een 25-tal graden hoogte. Door deze ‘verschuiving der spiegelbeelden’ (§ 16) ontstaat de donkerblauwe kleur der zee, en de tegenstelling tussen zee en lucht bij de kim; die tegenstelling is vandaag zo sterk, omdat de lucht bij de kim zo licht is, en al op korte afstand daarboven zo diepblauw. Ga dit na, door met een spiegeltje het beeld der hogere delen van de hemel nabij de kim te werpen: het is verrassend! Merk tevens op, dat de zee in de verte nog heel wat donkerder is dan de donkerste delen van de hemel: het terugkaatsend vermogen van het zee-

oppervlak is ver van 100%. De tegenstelling tussen zee en lucht, die het sterkst is in het Westen, wordt geringer naar Noord en Zuid: dit komt, omdat de meeste golfjes uit het Westen aankomen; naar Noord en Zuid kijken we meer evenwijdig aan de golfkammen, die dus minder invloed hebben (§ 17).

Wellicht zouden wij er aan kunnen twijfelen, of de sterke tegenstelling die de zee vandaag met de lucht vertoont niet nog een andere reden heeft dan de snelle helderheidstoeneming van de blauwe lucht nabij de kim. De natuur zal ons overtuigen: even bedekt zich een deel van de Westelijke hemel met cirrussluiers, zodat de lucht over de eerste 30$^{o}$ ongeveer gelijkmatig witachtig is; onmiddellijk is in die richting het sterke kontrast van de zee met de lucht verdwenen, en heeft zij een veel grijzer, lichter tint aangenomen. Als daarna de cirri verdwijnen, herstelt zich het kontrast.

De grote invloed van de terugkaatsing op de kleur der zee mag er niet toe leiden, de andere factoren helemaal te verwaarlozen. Hier en daar ziet u de schaduw van een afzonderlijke wolk. Daar is de zee donkerder, over de zonnige gebieden lijkt ze meer zandkleurig; maar dit laatste is een kontrastverschijnsel, want als u door de holle hand of door het gaatje van de nigrometer kijkt (§ 174), ziet u dat ze daar eigenlijk ook blauw is, - ofschoon minder dan in de schaduwgebieden.[1)] In elk geval bewijzen deze schaduwen duidelijk, dat de kleur der zee niet geheel door terugkaatsing wordt bepaald, maar dat een gedeelte van het licht terugverstrooid uit de diepte komt. De schaduw wordt zichtbaar, omdat het terugverstrooide licht daar geringer is dan elders, terwijl het teruggekaatste licht niet verzwakt wordt (§ 209).

Schijnt het zand van de bodem niet rechtstreeks door het water heen, en kan men aldus de zandbanken niet van verre herkennen? Naar mijn ervaring niet, althans niet voor een waarnemer die op de dijk of aan 't strand staat. Men ziet het zand slechts daar, waar het water uiterst ondiep is, misschien 10 tot 20 cm. De plaats van de zandbanken komt echter te voorschijn doordat zich daar brandingsgolven vormen, en doordat de tussenruimten effener zijn (§ 210).

Merkwaardig is, *dat de zee nabij de kim dikwijls een zoom heeft waar het grijs overgaat in blauw* (of het blauw in donkerder blauw);

1) De Noordzee vertoont het mooiste blauw als ze helemaal effen is, de lucht in 't Westen helderblauw, de zon door wolken afgeschermd zodat de zee in de schaduw ligt.

die zoom is wellicht maar een halve graad breed; hij verdwijnt als we van de dijk afdalen en aan 't strand gaan kijken, hij verdwijnt nog vollediger als we ons aan 't strand bukken! Het is dus geen kontrastzoom (§ 91). Waarschijnlijk ontstaat hij, doordat de zee betrekkelijk donker is, en dus in de verte *door de verstrooiing van de lucht* blauwachtig wordt (§ 173).[1] Ook zou denkbaar zijn, dat de zee op die grote afstand van de kust minder troebel is, en dat we dus rechtstreeks het helderder water in de verte herkennen, als we maar hoog genoeg staan om zo ver te kunnen zien.

Later op de dag verplaatst zich de Zon, en in de namiddag zien we duizenden fonkelingen op het water in de richting van waar ze schijnt. Haar eigenlijke spiegelbeeld zien we niet, daartoe kijken we veel te vlak over 't water, we zien alleen een stuk van de ontzaglijke lichtzuil die zij over het onregelmatig golvend oppervlak teweegbrengt. De zee wordt naar die richting toe lichtgrijs, bijna wit.

Na zonsondergang weerspiegelt de zee in het Westen de heldere lichtschijn en de goudkleurige cirrussluiers; door de golving van het oppervlak en de verschuiving der spiegelbeelden vertoont zij ons de gemiddelde tint van het Westelijk gedeelte van de lucht. Naar Noord en Zuid is de hemel minder gekleurd en zijn de tinten der zee doffer. Onze blik wordt steeds weer naar de kleurenpracht van het Westen getrokken. Hier en daar is er tussen de goudgele wolken een stuk blauwe lucht te zien, dat door de tegenstelling onwaarschijnlijk mooi verzadigd lijkt. Geleidelijk gaan de kleuren in oranje over, en de zee volgt die tint, terwijl het schuim der brandingsgolven door kontrast violet lijkt. Helemaal op de voorgrond is een strook nat zand, dat net door de golven bevochtigd is, en dat effen en zuiver bepaalde delen van de hemel weerspiegelt (zonder verschuiving!): eerst prachtig helderblauw, later zachtgroen. Tenslotte zijn de cirruswolken in 't Westen niet meer verlicht, ze krijgen een donkerviolette kleurtoon, en evenzo dempt zich de kleur der zee; maar onder deze rustige avondkleuren trekt nog de voorste strook nat zand een streep van warm oranje.

### 3. *Opkomende krachtige wind, grijze lucht*.

Over heel de zee hebben de aanrukkende golven schuimende kopjes, vier of vijf franjes van schuim omzomen de kust; uit het

1) Die zoom was ook duidelijk op dagen met *geheel struktuurloze grijze lucht*, maar matige wind en vrij donkere zee.

Zuidwesten waait de wind en jaagt de golven voor zich uit. De zee is grijs zoals de wolken, ietwat groenig grijs; dicht bij de kust zien we de afzonderlijke golfjes en kunnen nagaan, dat het groenige bestanddeel van de kleur afkomstig is van de voorste hellingen der golven, die weinig licht weerspiegelen, maar grauwgroen verstrooid licht uit het inwendige laten uittreden. Het water schijnt erg troebel, er is roering en er moet veel zand in 't water zweven. Naar het Zuidwesten, van waar de wind komt, is de zee het donkerst; naar 't Zuiden en vooral naar 't Noorden toe wordt haar tint lichter en nadert tot die van de grauwe lucht, hoewel nog iets donkerder blijvend (hier kijken we evenwijdig aan de richting der golfjes). Nabij de kim is de zee blauwiger: het is de kleur der donkere lage wolken, blauwend door de luchtverstrooiing op deze grote afstanden, terwijl ze boven onze hoofden gewoon helder - of donkergrijs zijn; hierbij komt nog het verschijnsel van de blauwe kimrand (blz. 300). Waar een afzonderlijke sombere wolk temidden van de grijze lucht hangt, is op het oppervlak der zee het onduidelijke, verschoven spiegelbeeld te herkennen, donker blauwgrijs. Nergens is de kim scherp; vooral naar het Zuiden en naar het Noorden werpt het schuim van de branding een nevel van waterdruppeltjes in de lucht, die reeds op enkele kilometers afstand het zicht merkbaar slechter maakt, en in de verte zee en lucht in elkaar doet vervloeien.

- Bij opklarend weer met NW-wind gelijkt de toestand enigszins op de hier geschetste, maar de hemel is een verward door-elkaar van stukken blauw; fel door de Zon verlichte witte wolken, lichtgeel getint door het luchtperspektief (§ 173); en donkere, blauwachtige massa's. Naar elke windstreek weerspiegelt de zee een gemiddelde van de hemelkleur op $20^{\circ}$-$30^{\circ}$ hoogte. Alleen de grote partijen zijn in die weerspiegeling terug te vinden; wel het meest vallen de zonbeschenen wolken op, die een glans van licht werpen over de onrustige, donkere zee.

### 4. *Storm.*

Nog ben ik achter de dijk en de huizen, en reeds hoor ik de zee razen, luid. Van op de boulevard zie ik de gehele brandingszoom, ruim ⅔ van het zeetafereel, met ziedend schuim bedekt, wit bij de golfkammen, vuilwit en uiteengerafeld tot een netwerk in de dalen tussen de golven. Evenals gewoonlijk is de voorkant der golven donkerder in 't Westen dan naar Zuid of Noord, en daardoor lijkt het tafereel naar West rijker aan tegenstellingen en wilder. In hoge zee steken afzonderlijke schuimende koppen

aan alle kanten op uit het donkere water. Een zonbeschenen strook ver in 't Zuiden tekent zich scherp en schitterend felwit af op het schuimend oppervlak, lijkt eerst heel smal en lang, nadert, en groeit tot een heel gebied. Sterk komt de zandkleur van het water te voorschijn, in de gedeelten waar schuim ontbreekt en de zonbeschenen zee donkere wolken weerspiegelt; bij deze belichting is het terugverstrooide licht zo sterk mogelijk, temeer omdat de roering van de aanstormende golven veel zand zwevende houdt. De lucht is hier en daar zeer donker, elders weer lichter, en er zijn enkele stukken blauw; de verschoven spiegelbeelden zijn heel onduidelijk terug te vinden in de algemene tinten der zee. - De allesoverheersende indruk is het schuim.

Onderzoek licht en kleur over de Noordzee bij allerlei toestanden van zee en lucht!
Beoordeel de kleurverdeling van op de dijk; daarna afdalen tot aan 't strand om de afzonderlijke golfjes te bestuderen. Onderzoek ook de kleur der zee als u aan 't baden bent; bekijk de golfjes dan ook eens in de richting van zee naar land; zoek de schaduw van andere baders en van uzelf! Gebruik de waterkijker. Wandel op het zuidelijk havenhoofd in IJmuiden, en vergelijk de zee tussen de havenhoofden met de zee daarbuiten! De toestand van de lucht is dezelfde, verschillen ontstaan door verschillen in golving van het oppervlak of verschillen in troebelheid.

Onderzoek de algemene helderheid van het zee-oppervlak in de late avond en 's nachts. Die is zo goed te beoordelen, omdat men geen last heeft van kleurverschillen en niet wordt afgeleid door kleine bijzonderheden.
Hoed u voor kontrastverschijnselen! Om verschillende delen van de zee en de lucht met elkaar te vergelijken, kunt u met voordeel een spiegeltje gebruiken (§ 176). Houd de hand of een ander donker voorwerp tussen de twee te vergelijken velden A en B, die aldus aan beide kanten aan hetzelfde vlak grenzend gezien worden. Gebruik de nigrometer!
Verwar nooit de *schaduwen* en de *spiegelbeelden* der wolken, die op geheel verschillende plaatsen vallen! Bij een lucht met afzonderlijke wolken wordt de gehele lichtverdeling over de zee beheerst door de combinatie van spiegelbeelden en schaduwen.

## 212. De kleur van de zee, gezien van op een schip.

Vergeleken met het tafereel aan het strand, is er een groot verschil: het ontbreken van de brandingsgolven. Daardoor is het gehele beeld veel symmetrischer om den waarnemer. De symmetrie wordt echter toch nog gestoord door de wind, die een voorkeursrichting aan de golfjes geeft; door de rook van het schip, die als een donkere wolk werkt; door het schuimende kielzog; door de Zon.

Naast en achter het schip kan men het best de kleur beoordelen

van het uit de diepte terugkerende licht, vooral daar waar wolken luchtbelletjes voortdurend door het water worden gejaagd en dan langzaam opstijgen. Op deze plaatsen ziet men duidelijk een mooie, groenblauwe tint. Dezelfde tint bemerkt men, teruggekaatst door de witte buik van de bruinvissen die om het schip spelen; of door een wit keitje dat men in het water laat vallen. Men ziet ze in alle oceanen, zowel daar waar de zee als geheel indigoblauw als daar waar ze groen is.

Zij ontstaat, omdat het licht op zijn weg door het water tengevolge van echte absorptie vooral zijn gele, oranje en rode bestanddelen verliest; de groenige tint is wellicht daaraan te wijten dat de violette stralen het sterkst wegverstrooid worden.

De gedeelten met weinig schuim tussen de schuimende groene massa's vertonen meestal een purperkleur, die complementair is van het groen, en als physiologische tegenstellingskleur op te vatten is (§ 95).

In ondiepe zeeën, dicht bij de havens of aan de mondingen van grote rivieren, is het zeewater zeer troebel. Daardoor wordt er betrekkelijk veel licht uit de diepte terugverstrooid, zodat de omstandigheden enigszins dezelfde zijn als bij het bekijken van de zwermen luchtbellen in het kielzog van het schip. De groene kleur is hier overheersend, wellicht ook omdat het rivierwater humuszuren en ferri-verbindingen aanvoert (§ 207), waarvan de geelachtige absorptie zich op de blauwgroene waterkleur superponeert. - Het is op zulke ondiepe, groene zeeën dat de wolkenschaduwen zich prachtig purperviolet aftekenen bij windstille dagen (§ 216).

De ‘waterkleur’, die door witte voorwerpen op kleine diepte wordt vertoond, is echter in 't algemeen niet dezelfde als ‘de eigen kleur van de zee’ in haar volle diepte.

Om deze te onderzoeken moet het teruggekaatste licht vermeden worden, door bijvoorbeeld tegen de vóórkant van een golf te kijken, of een der hulpmiddelen van § 209 te gebruiken. Deze eigen kleur van de diepe zee verschilt zeer duidelijk volgens de zee waarin men vaart; gedurende een reis van Nederland naar Indië bijvoorbeeld is dat prachtig waar te nemen. In hoofdzaak geldt volgende verdeling[1)]:

| | |
|---|---|
| olijfgroen | boven 40° N.Br. |
| indigo | tussen 40° en 30° N.Br. |
| ultramarijn | beneden 30° N.Br. |

1) Nat. **84**, 87, 1910.

Soms komt het vóór dat olijfgroene gebieden als vlekken tot in lagere breedten afdalen. Het schijnt de moeite waard, te onderzoeken of die groene kleur op éénzelfde plaats niet wisselt met het jaargetijde, want er zijn aanwijzingen in die richting.[1] In het algemeen is de oorsprong van de groene kleur van bepaalde diepe zeeën nog niet geheel opgehelderd. Er is waargenomen, dat hun water veel zwevende deeltjes bevat; toch kan men berekenen dat de gewone absorptie van water, gecombineerd met verstrooiing zelfs aan grote deeltjes, wel allerlei overgangen van donkerblauw naar bleekblauw of grijs kan veroorzaken, maar nooit de groene kleur verklaart. Sommigen hebben daarom gedacht aan diatomeeën en aan de uitwerpselen van vogels die zich met diatomeeën voeden. Anderen aan een eigen gele kleur van de verstrooiende deeltjes, die bijvoorbeeld uit geel zand zouden kunnen bestaan. Kort geleden werd tot ieders verbazing medegedeeld dat die groene kleur ontstaat door *fluorescentie* van een organische zelfstandigheid![2] De waarnemingen over invloed van het jaargetijde wijzen in elk geval duidelijk op een organische oorsprong.

In zeldzame gevallen ziet het zeewater er melkwit uit: blijkbaar zijn er dan zoveel zwevende deeltjes nabij het oppervlak, dat de verstrooiing geheel overheerst ten opzichte van de absorptie, en dat het licht reeds in de bovenste waterlagen terugverstrooid wordt.

## 213. De kleur van de meren.[3]

De kleur van het water der meren is een bron van grote schoonheid in het berglandschap. Hun diepte is meestal voldoende groot om de invloed van de kleur van de bodem gering te maken; in dit opzicht gelijken ze dus op de zee. Maar zij onderscheiden er zich van door de veel grotere effenheid, die zelf weer volgt uit het kleinere wateroppervlak en de meestal bergachtige oevers welke de wind tegenhouden. De regelmatige terugkaatsing door het oppervlak krijgt daardoor een veel groter belang dan bij de zee; nergens worden de kleuren van de zonsondergang zo heerlijk weerspiegeld als bij een meer, en de zeer verschillende tinten der bergmeren zijn stellig voor een gedeelte toe te schrijven aan

1) Ann. Hydr. **30**, 429, 1902.
2) Ramanathan, Phil. Mag. **46**, 543, 1923.
3) Arch. sc. phys. nat. **17**, 186, 1904; **20**, 101, 1905.

weerspiegeling van de oevers. Als deze echter hoog en donker zijn, wordt de terugkaatsing van het oppervlak uitgeschakeld, en ziet men over grote stukken van het meer de kleur van het licht, dat onder steile hoeken in het water gedrongen en weer naar buiten verstrooid is. Met behulp van de vroeger aangegeven hulpmiddelen (§ 209) krijgt men een indruk van die 'eigen kleuren'. Ze zijn verschillend van meer tot meer, en kunnen volgenderwijze onderverdeeld worden: 1. zuiver blauw; 2. groen; 3. geelgroen; 4. geelbruin.

Nader onderzoek in 't laboratorium heeft aangetoond, dat bij de blauwe meren het water bijna volmaakt zuiver is, en dat de kleur ontstaat door de absorptie van het water in het oranje en rood. Bij de volgende soorten komt er in steeds sterkere mate absorptie in het blauw en violet bij, tengevolge van het toenemend gehalte aan ijzerzouten en humuszuren, of tengevolge van de verstrooiing door bruingekleurde stofjes (§ 207).

De groene kleur van kleine vijvers is dikwijls toe te schrijven aan mikroskopische groenwieren, die in talloze hoeveelheden in 't water leven; vandaar waarschijnlijk de tint van het 'Groene Water' aan de Plasmolen te Mook, dat ook in de winter groen is, als de blaren afgevallen zijn en alles onder de sneeuw ligt. Roodkleuring kan veroorzaakt zijn door andere mikroskopische wezentjes: Beggiatoa, Oscillaria rubescens, Stentor igneus, Daphnia pulex, Euglena sanguinea, of Peridiniën.

Voor de polarisatie, vgl. § 214.

## 214. Waarnemingen van de kleur van water met een nicol.[1)]

Wij herinneren er even aan, dat een nicol alleen de lichtstralen doorlaat, welke 'evenwijdig aan zijn korte diagonaal' trillen. Aangezien het licht dat door het water teruggekaatst wordt in hoofdzaak horizontaal trilt, kunnen we dit teruggekaatste licht dus verzwakken door de nicol met zijn korte as vertikaal te houden; en zelfs is die uitdoving volledig, wanneer we onder een invalshoek van $65^{o}$ met de loodlijn waarnemen ('polarisatiehoek'). Doe de proef aan kleine plassen water op de weg, na een regenbui. Stel u op een afstand van 5 m en houd de korte diago-

1) C.R. **108**, 242 en 337; **109**, 412, 1889. - E.O. Hulburt, J.O.S.A. **24**, 35, 1934. De waarnemingen kunnen ook met films van 'polaroid' geschieden (§ 181).

naal van de nicol loodrecht: het effekt is verrassend, u ziet nu zò goed de bodem, dat het wel lijkt alsof er geen plas was! Draai de nicol afwisselend horizontaal en vertikaal; het is alsof de plas groter of kleiner wordt.

In het algemeen verhoogt de nicol de kleur van het natte strand, zeewier, granietblokken, een natte weg, een tabaksveld, geverfde oppervlakken; kortom, van alle glimmende voorwerpen in het landschap. Want hij neemt altijd een gedeelte van de terugkaatsing aan het oppervlak weg, die een neutraal wit gemengd had bij de kleur van het ding zelf.

Bij rustige zee doet een nicol met vertikale trillingsrichting de tegenstellingen sterker uitkomen tussen de zonnige gebieden en de wolkenschaduwen: de aan het oppervlak teruggekaatste stralen worden uitgedoofd, en de verschillen in 't verstrooide licht komen dus duidelijker te voorschijn.

Eveneens versterkt hij de tegenstelling tussen de gebieden der zee waar er een olielaagje op het water drijft en de overige (§ 211); wellicht omdat de terugkaatsing tegen de rimpelingen onder een andere hoek gebeurt dan tegen de gladde gebieden; ofwel omdat de polarisatie bij terugkaatsing door het olielaagje gestoord wordt. Opvallend is de uitwerking van de nicol als er enige wind is. Kijk naar de aanstormende golven met vertikaal trillend licht: de zee lijkt nu veel ruwer dan bij waarneming in horizontaal trillend licht. Want in het eerste geval dooft de nicol het teruggekaatste licht uit, maakt dus het zeeoppervlak donkerder, terwijl het schuim zijn helderheid bewaart en meer opvalt.

Dikwijls wordt de kim duidelijker als men de nicol geschikt instelt. Zo was de uitwerking duidelijk op een ochtend te Zandvoort, in de richting naar 't Zuiden: bij vertikale trillingsrichting werd de zee donkerder en de blauwe lucht (relatief) helderder (§ 211). Voor dit doel worden thans wel nicols in sextanten gezet.

De volgende proeven hebben betrekking op de polarisatie van het licht dat door diepe tropische zeeën met zuiver water wordt verstrooid.[1)] Neem aan dat we de proef kunnen nemen bij vrij hoge Zon en effen wateroppervlak; keer de rug naar de Zon, kijk ongeveer onder de polarisatiehoek en houd de korte diagonaal vertikaal: het teruggekaatste licht wordt uitgedoofd, en u ziet de prachtige blauwe gloed van het licht dat, na verstrooiing, uit de diepte komt. Draai de nicol tot de korte diagonaal waterpas staat: de zee lijkt nu *minder blauw* dan zonder nicol. - Neem ook

1) C.V. Raman, Proc. R. Soc. **101**$^{A}$, 64, 1922.

een proef bij halfhoge zon, weer de korte as vertikaal houdend, en varieer nu het azimuth; inzonderheid een vergelijking van de kleur naar de Zon toe en van de Zon af is belangwekkend: in het eerste geval ziet u een donkere indigokleur, omdat u, loodrecht ongeveer op de zonnestralen kijkend, niet alleen het teruggekaatste licht, maar ook het uit de diepte verstrooide heeft uitgedoofd; in het tweede geval is de kleur helderblauw, omdat u in de richting ongeveer van de zonnestralen kijkt die in 't water dringen, en het in uwe richting terugverstrooide licht bijna ongepolariseerd is. Beide proeven bewijzen, dat de verstrooiing van het licht in de zee voor een groot gedeelte gepolariseerd is zoals die aan de lucht (§ 181), en dus door zeer kleine deeltjes, vermoedelijk door de watermolekulen zelf moet geschieden.

Met de nicol heeft men ook een kenmerkend onderscheid gevonden tussen de terugverstrooide straling in blauwe meren en in donkere, bruine meren. Men vermijdt de terugkaatsing met behulp van een waterkijker (§ 209), en kijkt naar de windstreek waar zich de Zon bevindt. De nicol leert nu, dat bij blauwe meren het terugverstrooide licht horizontaal trilt, zoals men verwachten kan wanneer de verstrooiende deeltjes heel klein zijn; terwijl de grotere deeltjes in bruinere meren vrijwel ongepolariseerd licht geven, waarin de vertikale componente bij het uittreden uit het water iets gaat overheersen (indien de waterkijker niet van een ruitje aan het eind voorzien is).

## 215. Schalen voor de schatting der kleuren van water.[1)]

Veel gebruikt is de schaal van Forel. - Maak eerst een blauwe en een gele oplossing van kristallen kopersulfaat en kaliumchromaat:

0,5 gr $CuSO_4$. Aq. + 5 $cm^3$ ammonia + water tot 100 $cm^3$;

0,5 gr $K_2CrO_4$ + water tot 100 $cm^3$.

Maak nu de volgende mengsels:

| | | | |
|---|---|---|---|
| (1) | 100 blauw + 0 geel; | (7) | 73 blauw + 27 geel; |
| (2) | 98 blauw + 2 geel; | (8) | 65 blauw + 35 geel; |
| (3) | 95 blauw + 5 geel; | (9) | 56 blauw + 44 geel; |
| (4) | 91 blauw + 9 geel; | (10) | 46 blauw + 54 geel; |
| (5) | 86 blauw + 14 geel; | (11) | 35 blauw + 65 geel; |
| (6) | 80 blauw + 20 geel; | (12) | 23 blauw + 77 geel; |
| | | (13) | 10 blauw + 90 geel. |

1) W. Ule, Peterm. Mitt. **38**, 70, 1892.

Dikwijls doet zich de behoefte gevoelen aan bruinere tinten, vooral bij het schatten der kleur van meren. Maak daartoe een bruine oplossing:

0,5 gr. cobaltsulfaat + 5 $cm^3$ ammonia + water tot $100^3$ cm.

Meng deze oplossing met de groene oplossing van Forel (trap 11):

| | | | |
|---|---|---|---|
| (11) | 100 groen + 0 bruin; | (11-6) | 80 groen + 20 bruin; |
| (11-2) | 98 groen + 2 bruin; | (11-7) | 73 groen + 27 bruin; |
| (11-3) | 95 groen + 5 bruin; | (11-8) | 65 groen + 35 bruin; |
| (11-4) | 91 groen + 9 bruin; | (11-9) | 56 groen + 44 bruin; |
| (11-5) | 86 groen + 14 bruin; | (11-10) | 46 groen + 56 bruin; |
| | | (11-11) | 35 groen + 65 bruin; |

Deze verschillende mengsels kan men bewaren in reageerbuisjes van b.v. 1 cm middellijn.

De grote moeilijkheid bij de toepassing der schaal is vooral, te weten welk punt van het wateroppervlak men als maatgevend moet beschouwen. Meestal tracht men de eigen kleur van het water te beoordelen (§ 209, 212).

Geen der schalen voldoet geheel. Men kan beproeven de tint met verf weer te geven en die voor latere vergelijking te bewaren.

## 216. Schaduwen op het water.

‘Overal waar men een schaduw ziet op helder water, en in zekere mate ook op vuil water, daar is het niet als op 't land een donkerheid die de algemene zonnige tint dempt tot een lagere toon, maar het is een gebied van geheel andere kleur, dat zelf door zijn terugkaatsingsvermogen onderworpen is aan oneindige verscheidenheden van diepte en tint, en onder sommige omstandigheden geheel onzichtbaar kan worden.[1)]’

Het licht dat wij van een wateroppervlak toegezonden krijgen, is voor een gedeelte afkomstig van het oppervlak en voor een gedeelte uit de diepte. Onderscheppen wij dus de invallende zonnestralen, dan kunnen beide bestanddelen gewijzigd worden.

### *a. Invloed van de schaduw op het teruggekaatste licht.*

‘Als het oppervlak gerimpeld is, wordt een zonnebeeldje weerkaatst door elke ribbel tot op een bepaalde afstand van den waarnemer, afhangend van de grootte en vorm van die

1) Ruskin, Modern Painters, III, 505.

ribbels (vgl. § 14). Vandaar die verblindend heldere velden van licht, die men zo dikwijls over de zee uitgespreid ziet. Ieder voorwerp dat tussen de Zon en die ribbels komt, ontneemt hun het vermogen de Zon terug te kaatsen, en dus al hun licht: alle tussengeschoven voorwerpen werpen dus op dergelijke oppervlakken zeer krachtige schijnbare schaduwen van nauwkeurig dezelfde vorm en plaats als de echte.'[1]

De waarheid van Ruskin's woorden kan men het best nagaan als het water van een singel b.v. sterk gerimpeld is, 's avonds bij winderig weer. We kijken al lopend naar de terugkaatsing van een straatlantaren, uitgebreid tot een onregelmatig flonkerende lichtvlek; telkens zien we nu schaduwen over die lichtvlek schuiven, bijvoorbeeld die van bomen die zich tussen de lantaren en de singel bevinden. Zolang wij niet op het gunstige punt stonden, merkten wij niets van de aanwezigheid dezer schaduwen op het water; ze komen slechts binnen een kleine ruimtehoek te voorschijn. Ruskin heeft lange discussies gevoerd met critici en belangstellenden over de vraag of men hier wel van 'schaduwen' spreken mag.[2] Dit is natuurlijk een woordenkwestie!

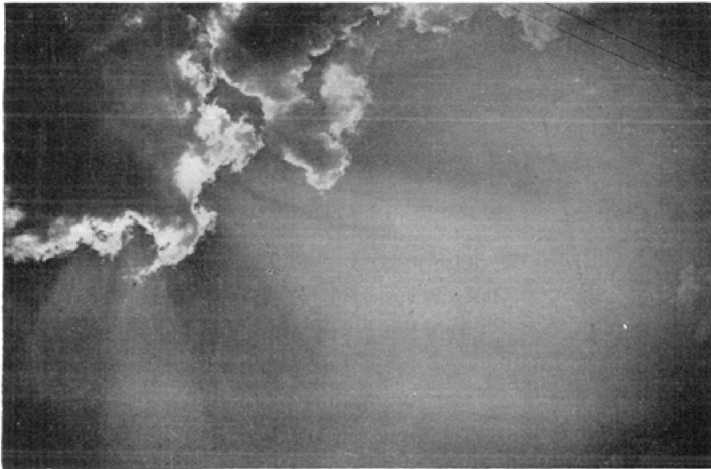
Een ietwat ander effekt is het, als de maan weerspiegeld wordt in een lange baan van licht, en wij plotseling een zeilboot zien opdoemen die vóór deze schitterende lichtstrook schuift als een diepzwart silhouet. De boot wordt hier zelf als een donker *voorwerp* gezien tegen een achtergrond van licht; maar zij werpt òòk een *schaduw* naar ons toe, over 't gerimpelde water, en daarvoor gelden dan weer de vorige beschouwingen.

### *b. Invloed van de schaduw op het terugverstrooide licht.*

Op troebel water tekenen zich de schaduwen af; de grotere of geringere duidelijkheid van de schaduw geeft onmiddellijk een indruk van de troebelheid of helderheid van het water. Let op de schaduwen van bruggen en bomen op onze binnenwateren! Als u op zee vaart, zoek dan uw schaduw op het water: u vindt ze alleen aan die kant waar het schip het water in roering heeft gebracht en het met luchtbellen heeft vermengd, niet waar de zee helder en diepblauw is. Bemerk de wolkenschaduwen over het zee-oppervlak!

De schaduw wordt zichtbaar, omdat het licht dat in het water dringt en na verstrooiing terugkeert, op die plekken geringer is

1) Ruskin, Modern Painters, III, 504.
2) Modern Painters, appendix; III, 655.



PLAAT XIV*a*. De zon werpt de schaduw van een zware stapelwolk op de heiige lucht daaronder. Alle bundels schijnen van éénzelfde punt te komen, al zijn ze in werkelijkheid evenwijdig.



PLAAT XIV*b*. Mijn schaduw valt op een gerimpeld wateroppervlak: ontelbare lichte en donkere stralen gaan van het hoofd uit. De camera werd vlak vóór het oog gehouden.

dan elders. Het aan de oppervlakte teruggekaatste licht daarentegen is niet verzwakt, en krijgt dus een relatief groter belang. Vandaar dat bij blauwe lucht een wolkenschaduw op zee dikwijls blauwachtig is; de tegenstelling met het omgevende groen kan die kleur nog iets naar purper verschuiven (§ 209, 211, 212). Naast de helderheid van het water is ook de waarnemingsrichting van belang. Bij het baden in zeer helder water ziet u geen schaduwen; bij het baden in licht troebel water ziet u alleen uw eigen schaduw en niet die der

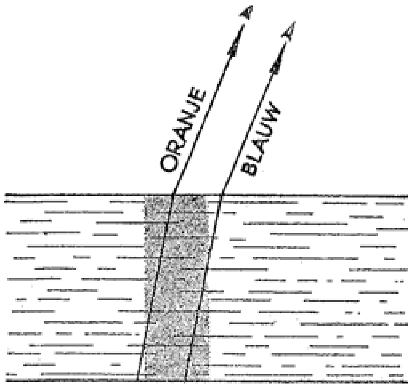


Fig. 159. Het ontstaan der gekleurde randen aan schaduwen in troebel water.

andere baders; bij zeer troebel water ziet u die van alle baders.

Merk op hoe de schaduw die een paal over het ietwat troebele water van een singel werpt, alleen goed te zien is als u gaat staan in het vlak Zon-paal, en dus naar de hemelstreek kijkt waar zich de Zon bevindt: dan ziet u de schaduw vrij plotseling in het water opdoemen. Het is hetzelfde verschijnsel dat we al bij mist hebben beschreven.

Aan de schaduwen op licht troebel water is er nog iets anders waar te nemen: *hun randen zijn gekleurd*, de naar ons toegekeerde rand is blauwachtig, de van ons afgekeerde is oranje. Dit verschijnsel is op te merken aan de schaduw van elke paal, van elke brug, van elk schip. Het is een gevolg van de verstrooiing door de ontelbare stofjes die in 't water drijven; daaronder zijn er ook veel zo klein, dat ze bij voorkeur de blauwe stralen verstrooien. Nu ziet men in fig. 159, dat de deeltjes aan onze zijde lichtend gezien worden tegen een donkere achtergrond, zodat zij een blauwachtig licht naar ons oog zullen zenden; terwijl we aan de van ons afgekeerde zijde der schaduw het licht van de bodem zien (of van het verstrooiende water in de buurt), van blauwe stralen beroofd en oranje gekleurd door de niet verlichte deeltjes in de schaduw. Het verschijnsel is dus hetzelfde als de blauwe lucht en de gele ondergaande Zon (§ 172). Het kontrast der twee tegengestelde randkleuringen maakt ons oog bijzonder gevoelig ervoor.

Onderzoek de kleur der randen van allerlei richtingen uit, voor allerlei verschillende gevallen van lichtinval en schaduw. Zeer duidelijk is ook de blauwige kleur van smalle lichtbundels die tussen 't gebladerte dringen, het water bereiken van een heldere sloot in het bos, en een oranje lichtvlek op de bodem maken.

## 217. Lichtaureool om onze schaduw in water (plaat XIV*b*).

*Ik ook zag de fijne middenpuntvliedende lichtspaken*
*om de schaduw van mijn hoofd in het zonbeschenen water* ...
*Straalt uit, fijne lichtspaken, van de schaduw van*
*mijn hoofd, van ieders hoofd, in het zonbeschenen water* ...

*Walt Whitman, Met de Veerpont naar Brooklyn*
(*Leaves of Grass*).

Dit mooie verschijnsel ziet men het best, als men van op een brug of het dek van een schip naar zijn schaduw kijkt, die ergens op het onrustig klotsende water valt. Men ziet dan hoe duizenden lichte en donkere lijnen van de schaduw van ons hoofd naar alle richtingen uitstralen. Ieder ziet de aureool alleen om zijn eigen hoofd (vgl. § 168)! De stralen convergeren niet *nauwkeurig* naar éénzelfde punt, maar slechts ongeveer.

Op rustig water is er niets van te zien; op water met regelmatige golven, ook niet; mooi wordt het verschijnsel alleen wanneer er aan alle kanten onregelmatige heuveltjes van het wateroppervlak oprijzen. Het water moet een weinig troebel zijn: naarmate men zich verder van de kust verwijdert en meer in volle zee vaart wordt de aureool zwakker.[1] Opvallend is ook, hoe de algemene helderheid in de omgeving van de schaduw toeneemt.

Verklaring: elke oneffenheid in het wateroppervlak werpt achter zich een streep van licht of van schaduw; al die strepen zijn evenwijdig aan de lijn Zon - oog. Wij zien ze dus perspektivisch samenkomen in het tegenpunt van de Zon, d.i. in het schaduwbeeld van ons hoofd (§ 191).

Soms zijn de strepen zo duidelijk, dat men ze zelfs op vrij grote hoekafstand van het tegenpunt der Zon nog volgen kan. Meestal echter zijn ze nabij het tegenpunt het duidelijkst, omdat onze gezichtsstraal daar over een grote lengte hetzij door helder verlicht water loopt, hetzij door beschaduwd water. De toeneming der algemene lichtsterkte in de nabijheid van het tegenpunt is wellicht daaraan toe te schrijven, dat de verstrooiing der stofdeeltjes in de terugwaartse richting sterker is dan dwars (§ 191).

1) C.V. Raman, Proc. R. Soc. **101**$^{A}$, 64, 1922.

Een dergelijke stralenkrans is ook waar te nemen als we ons bevinden in de schaduw van een losse boomkruin, die plekken licht en donker werpt op een effen wateroppervlak. De bundels licht die in de vloeistof dringen geven hetzelfde optische effekt als die welke door onregelmatigheden van het oppervlak ontstonden.

Het is interessant, te overwegen dat in werkelijkheid de lichtbundels in het water helemaal niet evenwijdig zijn aan de verbindingslijn Zon-oog, want ze zijn tengevolge van de breking over een bepaalde hoek afgeweken. Maar daar staat nu tegenover dat ons oog de sporen dezer bundels in het water òòk ziet vervormen door de breking, en dus het deel van de bundel dat zich in het water bevindt toch in de verlenging ziet van het deel van de bundel dat in lucht loopt.[1)]

## 218. De waterlijn op de kiel der schepen.

'Drie omstandigheden dragen er toe bij, de waterlijn op de houten kiel der schepen te verbergen: waar een golf *dun* is, ziet men er een weinig de kleur van het hout doorheen; waar een golf *glad* is, weerspiegelt ze een weinig de kleur van het hout; en waar een golf *breekt*, bedekt haar schuim min of meer de waterlijn.'[2)]

Men zou echter evengoed kunnen beweren, dat de waterlijn juist door deze zelfde faktoren zichtbaar wordt! Neem aan stilliggende en varende schepen waar, door welke optische verschijnselen wij beoordelen waar het water begint, waar zich dus de waterlijn bevindt.

## 219. Kleuren van watervallen.[3)]

Bij watervallen ziet men bij goede belichting dikwijls zeer mooi de groene kleur van het water dat over de rotsen glijdt. Merkwaardig is nu, dat de rotsen die hier en daar uitsteken, en die eigenlijk zwart of grauw zijn, een roodachtige tint schijnen te vertonen; het is voor de hand liggend dit als een tegenstellingskleur te verklaren (§ 95).

Het verschijnsel is het duidelijkst daar, waar het water wat

1) Physica, **11**, 368, 1931.
2) Ruskin, Modern Painters, III, 526.
3) Richarz, Wetter, **34**, 69, 1917.

schuimt en spat. Nu weet men dat in 't laboratorium tegenstellingskleuren altijd sterker optreden als men de grenzen tussen de velden onduidelijk maakt; om ons geval na te bootsen, kan men b.v. een reepje grijs papier op groene achtergrond leggen, met een blaadje dun zijdepapier erover, en ziet dan de tegenstellingskleur die het grijs krijgt zeer fraai doorschemeren ('Florkontrast'). Het schijnt niet onmogelijk dat in de natuur de lichte waternevel een dergelijke rol speelt.

## 220. De kleur der groene bladeren.

Bomen, weiden, akkers zowel als de afzonderlijke blaadjes vertonen ons een weelde van groene tinten in eindeloze verscheidenheid. Om regelmaat te vinden in de rijkdom van verschijnselen onderzoeken we vooreerst één blad van een 'gemiddelde' boom (eik, iep, groene beuk), en leren daardoor begrijpen hoe de kleurpartijen in het landschap ontstaan.

Een blad aan een boomkruin is meestal veel sterker belicht aan de éne dan aan de andere zijde; en nu komt het er erg op aan, *of we de rechtstreeks verlichte zijde bekijken of de achterkant*. In het eerste geval is het licht dat het blad ons toezendt voor een gedeelte aan de oppervlakte weerspiegeld, zodat de tint lichter maar grijzer wordt. Daarenboven mengt zich bij opvallend licht iets blauwachtigs, bij doorvallend licht iets geelachtigs bij het groen. Dat herinnert aan onze waarnemingen over lichtverstrooiing (§ 173)! Inderdaad spelen zich bij een blad, ook al is het nog geen millimeter dik, alle processen van terugkaatsing, absorptie en verstrooiing op dezelfde wijze af als in een oceaan van honderden meters diepte. De absorptie wordt hier teweeggebracht door de bladgroenkorrels, de verstrooiing geschiedt wellicht tegen de talloze korreltjes van allerlei aard waar de celinhoud zo rijk aan is, of ook tegen de oneffenheden van het bladoppervlak.

Bijzonder bekoorlijk is het smaragdgroen van goed verlicht gras, gezien van uit de schaduw en tegen een donkere achtergrond (fig. 160*a*). Het is letterlijk alsof elk blaadje inwendig gloeide in groene gloed. Het overvloedige zijdelings invallende licht wordt door de miljoenen korreltjes verstrooid, zodat het blaadje een stroom van zijdelings licht naar ons oog werpt.

Het verschil in kleur tussen een grasveld bij doorvallend licht en bij opvallend licht is onmiddellijk waar te nemen als men post vat in een weiland, en afwisselend naar de Zon toe en van de Zon

af kijkt. Met dit verschil komt overeen: het aan schilders welbekende onderscheid tussen het groen van Willem Maris in zijn tegenlichtlandschappen; en het groen van Mauve, die zich bij voorkeur van de Zon afwendt.

*Belichting door de Zon en door de blauwe lucht* verschillen daardoor, dat de Zon sterker licht geeft, maar licht dat meer plaatselijk

Fig. 160. Groene bladeren bij verschillende belichtingsomstandigheden.

weerspiegeld wordt, zodat het blad vlekkerig gaat lijken. Weerspiegelt het blad de zonnestralen ongeveer onder de spiegelhoek, dan nadert de kleur meer en meer tot heldergrijs of wit. Als de Zon zeer laag staat en het gehele landschap met dieprood licht overstroomt, verliest het gebladerte der bomen zijn frisse groene tint en wordt vaal: er zijn bijna geen groene stralen meer in de lichtbron, die door de bladeren terugverstrooid kunnen worden.

*Onder- en bovenkant van de bladeren* verschillen van tint, ook al zou de de belichting dezelfde zijn. De bovenkant is gladder, dus beter spiegelend, dus meer vlekkerig. De onderkant is doffer en bleker, vertoont meer huidmondjes, de cellen liggen veel losser en er zijn tussenruimten die met lucht gevuld zijn en het licht terugkaatsen eer het in de diepte van het blad is doorgedron-

gen (§ 224). Meestal is de bovenkant ook de verlichte kant. Beproef welke kleurverschillen optreden als we een blad van de boom 180$^{o}$ draaien, terwijl de belichting enz. gelijkblijft! - Zodra de wind ietwat sterk wordt, zien alle bomen er aan de lichtkant vlekkerig uit, over 't geheel bleker van tint dan gewoonlijk: dan worden de bladeren in alle richtingen gedraaid, we zien er evenveel van de onder- als van de bovenzijde.

*Jonge blaadjes zijn frisser, lichter van kleur dan oude*; dat verschil neemt geleidelijk af in de loop van de zomer.

*De bladeren aan de buitenkant van de kroon zijn anders dan die binnenin*: ‘lichtbladeren’ - ‘schaduwbladeren’. Grootte, dikte, beharing, maar ook kleur verschillen. De ‘waterscheuten’ aan de voet van de boom en hier en daar langs de stam hebben meestal een zeer lichte kleur.

Tenslotte speelt de *achtergrond* een belangrijke rol! Plaats u onder een boom en bekijk de kruin: dezelfde bladeren die men nu sappig groen ziet stralen tegen de achtergrond van andere bomen, veranderen in zwarte silhouetten zodra men zich iets verplaatst en ze tegen de lucht bekijkt. Het effekt hangt af van de verhouding van de helderheid van het blad tot de helderheid van de luchtachtergrond, en is dus zwak, als het blad van opzij verlicht wordt door de Zon (fig. 160*b*); en het sterkst, wanneer het blad slechts hemelstraling ontvangt, en wel van uit een beperkte ruimtehoek, zoals meestal het geval is als een boom door andere omgeven is (fig. 160 *c*) of bij de eenzijdige belichting der schemering. Het verschil tussen het gewone groen en het zwarte silhouet is dan zo sterk, dat men nauwelijks aan gezichtsbegoocheling kan geloven. En toch is dit niets anders dan tegenstelling: de heldere hemel is zo ongelofelijk veel helderder dan de aardse voorwerpen!

*Nog nauwlijks is het groen*
*der boomen groene, en even*
*zijn, toppewaarts, alleen*
*de takken groen gebleven*;
*al 't ander zwarter wordt*
*en zwarter: boomen net*,
*van zwarte zijde zijn 't*,
*op blauw satijn gezet*.

*In 't heerlijk zonnenveld*,
*dat donker wordt omhooge*,
*en langzaam donkerder*
*en dieper, staan ten tooge*,

*geschreven, zwart op goud,*
*een bende reuzen groot:*
*het eindloos boomenvolk*
*in 't eindloos avondrood.*

*G. Gezelle, Rijmsnoer, X* (*Avondrood*).

*De groene boomen schijnen zwart,*
*en in 't verborgen*
*trilt hoop op morgen.*

*R. de Clercq, Nagelaten Gedichten.*

## 221. De plantengroei in het landschap.[1)]

*De afzonderlijke bomen.* - Van alle bestanddelen van het landschap zijn het vrijwel alleen de bomen die, bij zijdelingse belichting, de wondermooie tegenstelling vertonen tussen de zonbeschenen en de beschaduwde helft; daardoor zien wij ze als lichamelijke dingen, die ons telkens weer 'de indruk geven, dat de ruimte met haar drie afmetingen een zichtbare werkelijkheid is.' Deze tegenstelling wordt verzacht door de ronding der boomkruinen, maar weer verlevendigd door de tegenstelling van de kleurtint.

Bomen in tegenlicht tekenen zich donker af tegen de verre achtergrond, waarvan zij voor ons gevoel de afstand, de verwijderdheid sterker doen uitkomen; dit is zowel te wijten aan de stereoskopische werking als aan het verschil van kleurtoon. Vandaar bijvoorbeeld dat zo menige stereoskoopplaat, zo menig schilderij van de streek der Oisterwijkse vennen een boom op de voorgrond heeft. Het is een effekt, enigszins vergelijkbaar met dat van een landschap, gezien door een open raam of van onder de welving van een poort. Gezien van onder het geboomte onzer lanen, lijken de gebouwen in de stad groter en statiger.

De tegenstelling met de achtergrond wordt het felst, als de boom zich tegen de oranje gloed van de avondhemel aftekent. Een fantastisch vervormde jeneverbesstruik op een eenzame zandrug, een plechtige sparreboom hebben zulke dichte naalden, dat zij een zwart, scherp omlijnd silhouet vertonen. De andere bomen zijn meer open; het ijlst zijn de ranke arabesken van de berkeboom, die juist bij dit tegenlicht een verrukkelijk kleurkontrast met de lucht vertoont.

1) Het eerste gedeelte van dit hoofdstuk geeft in grote trekken de inhoud weer van een verhandeling van Vaughan Cornish, Geogr. Journ. **67**, 506, 1926.

*Eind Februari, als er zon is, op een ochtend, zal ik je de kleur der berketwijgen tegen de azuren hemel laten zien. Alle ranke takjes schijnen te gloeien van een purper vuur, en de lucht blikt je met een wondere tederheid aan, dwars door die tengere gloed. Wacht, kijk goed, en ga slechts weg als je begrepen hebt. Men doet er zo'n voorraad geluk van op, dat men tot de volgende winter wachten kan op het weer verschijnen van dit lichtwonder.*
*Duhamel, La Possession du Monde, blz*. 126.

*Het woud*. - Van dichtbij gezien en in tegenlicht, vertoont het woud wel een zeer grillige kantlijn; maar het is toch weer te doorzichtig en te wisselend belicht om krachtig en massief te werken. Het vormt een beter geheel op iets grotere afstand, als de kruinen in 't volle zonlicht groen en goud stralen tegen een achtergrond van blauwende heuvels; of als groepen zonbeschenen loofhout zich tegen hoog en donker sparrebos aftekenen. In de verte tenslotte is het bos voor onze vlakke landen vergelijkbaar met een golvende heuvelrij; het is tenminste even donker van tint, en kleurt zich dus even mooi wazig blauw door de verstrooiing van de dampkring; het rangschikt zich in opeenvolgende rijen, die zich door het luchtperspektief van elkaar onderscheiden (§ 91).

Het landschap binnen in het bos is enig in zijn soort, doordat het noch horizonlijn noch kantlijn bevat. In de lente zien we aan alle kanten boven ons de groene blaadjes, stralend in geelgroen doorvallend licht. In de zomer rust het oog hier uit van de vermoeiende blakering der witte lucht, die de blik afschrikte, doordat het nu weer vrij en naar alle richtingen van de ruimte om zich heen kan zien. 's Middags komt het meeste licht in het bos stromen, omdat de hoogstaande Zon dan tussen de kruinen door kan schijnen. Het spel van licht en schaduw is in elk vlak weer anders; de bekoring ervan verdwijnt, zodra wij ons oog op een bepaalde afstand fixeren; en het verschijnt juist dàn weer, als wij er niet bewust naar zoeken, en onze omgeving ongedwongen en spontaan op ons laten inwerken. In de herfstochtend dringen de zonnestralen hier en daar tussen de stammen, en men ziet hun weg zich aftekenen in de licht heiige lucht, vooral als men in een richting kijkt in de buurt van de zon (§ 183): zo wordt de bekoring van het luchtperspektief in onze onmiddellijke nabijheid gebracht.

*De bloemen*. - De heide is vrijwel de enige onzer bloemen die uitgestrekte oppervlakken bedekt. Als ze in Augustus bloeit, ontstaat er een merkwaardig kleurenakkoord van de purperen



PLAAT XV.
Een heideveldje, gezien in de richting van de zon af en naar de zon toe; dit laatste is in de grote, vertikaal opgestelde spiegel waar te nemen.



Een grasveld met sporen van de snijmachine. De lichte en donkere banden verdwijnen als men loodrecht daarop kijkt.

aarde met de diepblauwe hemel, dat sommigen niet mooi vinden, maar dat voor anderen in het vele licht der vrije natuur juist een zeer bijzondere stemming medebrengt. Een grijs wolkendek verzacht de kleurenharmonie, maar doet ook tegenstellingen van licht en schaduw verloren gaan.

De bloeiende vruchtbomen danken hun pracht voor een groot gedeelte aan de geringe ontwikkeling der bladeren in dit jaargetijde. Tegen de blauwe lucht komen het wit en teerbleek rose slechts tot hun recht, wanneer de Zon er fel op schijnt; anders moet men ze zien van op een hoge dijk, tegen de achtergrond der weilanden.

Enig is de felle kleur der Nederlandse bloembollenvelden in de lente; met hun meetkundige strakke begrenzingen geven ze iets zeer bijzonders aan het landschap.

*Het weiland*. - Een effen vlak van éénzelfde kleur, de indruk teweegbrengend van vereffening en wijde ruimte; en toch in bijzonderheidjes oneffen genoeg om iets veerkrachtigs, molligs te suggereren. Waarom zou anders de indruk zo typisch verschillen van die ener zandvlakte? Op afstand loopt de groene kleur in blauwgroen over, en nog verder nadert zij meer en meer tot het atmosferische blauw der lucht.

### 222. Schaduwen en donkere partijen.

Kijk om u heen, en zoek waar er donkere partijen in het landschap zijn!

1. De bossen en struiken, namelijk de tussenruimten tussen de stammen.
2. In de stad: open ramen in de verte.
   Deze beide gevallen zijn voortreffelijke voorbeelden van een ‘zwart lichaam’ zoals de physicus het maakt. Het zijn ruimten waarin we slechts door een nauwe opening kunnen kijken; de lichtstralen die er in dringen kunnen er slechts uit na een aantal terugkaatsingen, waarbij ze telkens sterk verzwakt worden. Zulk een soort lichaam slorpt bijna alle stralen op: donkere bossen werpen slechts 4% van het licht terug. Anderzijds moet bedacht worden, dat de duisterheid van het bos slechts betrekkelijk is; komen we dichterbij, en heeft het oog zich eenmaal aan het gedempte licht aangepast, dan ziet men hoe alles licht en kleur vertoont. Evenzo kan men binnen in een kamer alle bijzonderheden onderscheiden, terwijl diezelfde kamer, van buiten gezien door het open venster, toch pikzwart leek.

3. Fijne voorwerpen die zich tegen de heldere lucht aftekenen lijken meestal zwart, maar alleen door de tegenstelling (§ 220).

Onderzoek stelselmatig de kleuren van de schaduwen!

'Alle gewone schaduwen moeten een of andere kleur hebben, nooit zwart, noch ongeveer zwart. Ze zijn klaarblijkelijk altijd van lichtende aard.... Het is een feit, dat de schaduwen net zo goed kleuren zijn als de lichte partijen' (Ruskin).

Waar de Zon schijnt, geven haar felle, geelachtige stralen de doorslag tegenover de straling van de hemel; maar waar er schaduw is, valt alleen licht van de blauwe of grijze lucht. De schaduwen zijn dus in 't algemeen blauwachtiger dan de omgeving, en dit verschil lijkt nog sterker uitgesproken door de tegenstelling.

'Ik zie van uit mijn raam de schaduw der mensen die in de Zon wandelen aan het zeestrand; het zand is uit zichzelf violet, maar het wordt verguld door de Zon; de schaduw van die mensen is zo violet, dat de grond geel lijkt' (Delacroix)

Is de zon half achter wolken verborgen, dan ziet men de schaduwen waziger worden. Is ze helemaal verdwenen, dan zijn er geen slagschaduwen meer, maar er zijn nog altijd donkerder en helderder partijen.

'Let in de straten bij avondschemering en betrokken lucht op het gelaat der mannen en vrouwen, hoeveel liefelijkheid en zachtheid erover ligt gespreid.'[1)]

Deze opmerking heeft mij meer dan eens verzoend met een troosteloze, grijsgrauwe dag!

Zeer scherpe slagschaduwen krijgt men 's avonds bij het licht ener booglamp, die bijna puntvormig is, en alle andere lichtbronnen in haar buurt overheerst; de gezichten krijgen een oudachtig voorkomen, doordat de rimpels overdreven duidelijk worden.

Tussen de scherpe schaduwen van de Zon en het alzijdige, diffuse licht van de bewolkte lucht zijn er allerlei overgangen. Een open plek in het bos bijvoorbeeld wordt door een beperkt stuk van de hemel verlicht, dat groter of kleiner kan zijn, en al naar gelang daarvan andere effekten teweeg brengt.

In vlak of zacht golvend land doen de schaduwen het relief slechts dàn uitkomen, wanneer de Zon zeer laag staat. Haar stralen vallen dan bijna rakelings over het terrein, en veroorzaken zeer bijzondere wisselingen van licht en schaduw. Op kleine

1) Lionardo da Vinci, Trattato, uitgave Preconi, blz. 16.

schaal maar in overdreven sterke mate kan men dit zien aan een oneffen zandvlakte omstreeks het ogenblik van de zonsondergang: ieder keitje, iedere oneffenheid werpt een lange schaduw, het terrein ziet er uit als was het een foto van een maanlandschap en maakt een geheel onwerkelijke indruk.

## 223. De belichting van een landschap, gezien van de Zon af en naar de Zon toe.

Bijna aan elk landschap is er een opvallend verschil in tint en struktuur waar te nemen, naarmate we in de richting van de Zon of in de tegenovergestelde kijken. 't Gehele voorkomen van de natuur verandert! Gebruik een spiegeltje, om het landschap in twee verschillende waarnemingsrichtingen tegelijk te kunnen zien (Plaat XV).

1. Een veld jong koren, een weide, een lupineveld zijn naar de Zon toe geelgroen, van de Zon af blauwig. De oorzaak? - Kijk eens naar één blaadje in het bijzonder, kijk ‘mikroskopisch’! Pluk het, houd het naar de Zon toe en van de Zon af. In het eerste geval ziet u vooral licht dat door het blaadje heen valt, in het tweede geval licht dat door de oppervlakte teruggeworpen wordt (§ 220). Soms worden die kleuren en glansen door de invloed van de windrichting gewijzigd.
2. De golven op een rijp roggeveld ontstaan vooral door het wisselend uiterlijk der *aren*. - Onderstel dat de wind naar de Zon toe waait:
   naar de Zon toe kijkend zien we bijna alleen heldere lichtgolven lopen; zij ontstaan als de aren zò hellen dat ze 't zonlicht naar ons oog weerspiegelen;

   van de Zon af kijkend zien we enige heldere, maar meer donkere golven; deze laatste ontstaan als de aren zò buigen, dat ze op zichzelf schaduw werpen. Bij andere windrichting, blikrichting, zonshoogte wijzigen zich de verschijnselen weer.
3. Een grasveld dat men met een grasmaaimachine maait, wordt veel lichter van kleur als men van ons af rolt dan wanneer men naar ons toe rolt[1]; in het eerste geval zien we veel meer teruggekaatst licht (Plaat XV; vgl. § 220). Zeer sterk is de tegenstelling op een stoppelveld, waarvan achtereenvolgende banen afwisselend helder en donker lijken, omdat de maaimachine er

1) Nat. **90**, 621, 1913.

in omgekeerde zin overheen is gegaan; keert u zich om, dan ziet u de tinten net omgekeerd. Vers geploegd land glimt, als men loodrecht op de richting der nog vochtige voren kijkt.

4. Eendekroos dat een sloot bedekt doet net andersom dan gras. Het is van de Zon af geelgroen, naar de Zon toe bleek grijsgroen. ‘Mikroskopische’ waarneming leert, dat in het tweede geval de onregelmatige terugkaatsing aan het oppervlak veel sterker is. Bij deze plant zien we niet door de blaadjes heen.
5. De uitgebloeide heide is naar de Zon toe donkerder, van de Zon af meer glanzend, zijig, licht bruingrijs, blijkbaar door spiegelingen (Plaat XIX).
6. Vruchtbomen in bloei ziet men alleen mooi wit van de Zon af. Naar de Zon toe tekent de bloesem zich zwart tegen de hemel af (§ 220, 221).
7. Evenzo zijn de takken en twijgen der bomen grijs of bruin van de Zon af, zwart en struktuurloos naar de Zon toe.
8. Een klinkerweg was bruinrood naar de Zon toe, witgrijs van de Zon af.
9. Een grintweg was witgrijs naar de Zon toe, bruingrijs van de Zon af.
10. 't Schuim der zee is helderwit tegenover de Zon. Naar de Zon toe echter ziet het er eer donkerder uit dan de omgeving, te midden van de duizenden terugkaatsingen en flikkeringen van het speelse water.
11. Een weg, bedekt met ruwe witte sneeuw, schijnt donkerder in de richting naar de Zon toe, lichter in de tegenovergestelde richting.[1)]
12. Golfjes op de Loosdrechtse plassen, wind waaiend naar de Zon toe. Van de Zon af kijkend is de indruk somberblauw; hier en daar stralen zwartblauwe stroken van ons waarnemingspunt uit, overeenkomend met blauwe delen van de hemel; de vele golven tekenen zich individueel af. Naar de Zon toe is alles lachend bleekblauw; de golven ziet men alleen in de verte, in ontelbare scharen (§ 211).
13. Merk op hoe u, in de richting van de Zon kijkend, de voorwerpen donker ziet, de schaduwzijde naar ons toekerend, maar met mooie lichte randen. Daaraan ontlenen ‘tegenlichtopnamen’ hun bekoring!

Enz. enz. enz.

Een onuitputtelijke gelegenheid tot waarnemen! Altijd de verklaring zoeken door afwisselend globaal en individueel te observeren!

1) Russell, Dugan, Stewart: Astronomy, **1**, blz. 173.

## 224. Invloed van vochtigheid op de tinten.

'Het is waar dat de nevelige dampkring alle voorwerpen verduistert, maar het is ook waar dat de natuur, niet willend dat onze ogen zonder genot zouden zijn, een rijke vergoeding heeft verschaft voor deze beschaduwing van de tinten: bij vochtige lucht worden zij levendiger. Elke kleur, vochtig, is tweemaal zo schitterend als droog; en wanneer de verten verduisterd worden door mist, de heldere kleuren van de hemel verdwijnen en de zonneschijnglansen van de aarde, dan neemt de vóórgrond zijn liefelijkste tinten aan, het gras en het gebladerte herleven in hun verzadigd groen, en elke zonverbrande rots ontgloeit tot een agaat.'

Verklaring: de vochtigheid zonder meer kan die verlevendiging van de kleur niet verklaren; maar zodra een dun waterhuidje de voorwerpen bedekt, is hun oppervlak daardoor gladder geworden, ze verstrooien niet meer het witte licht naar alle kanten, de eigen tint gaat dus overheersen en wordt verzadigder.

Door de regen verandert de kleur van de grond geheel. De straatkeien gaan spiegelen, des te meer naarmate ze verder van ons verwijderd zijn en onze blik hen minder steil treft; het is verrassend hoe niet alleen asfalt, maar ook een zeer hobbelige klinkerweg onder grote hoeken voortreffelijk terugkaatsen. Het zand, de aarde, de grintwegen krijgen een donkerder en warmer kleur[1)]; de eerste regendruppels reeds tekenen zich elk afzonderlijk als donkere vlekken af. Hoe komt dat? - Het water dringt overal in de tussenruimten tussen de zandkorrels. Een lichtstraal, die anders al in de bovenste lagen terugverstrooid zou zijn, kan nu veel dieper indringen eer hij teruggezonden wordt naar ons oog; op die langere weg wordt hij grotendeels opgeslorpt.

Een plasje water op een asfaltweg vertoont in mooie schakering van tinten:

1. het wateroppervlak dat de blauwe lucht weerspiegelt;
2. een zwarte zoom, waar de grond nog vochtig is;
3. de grijze omgeving.

Groenwieren in een sloot vormen een donkergroene, draderige massa; een gedeelte dat boven het water uitsteekt ziet er veel bleker groen uit, omdat er nu overal lucht tussen de draden is

1) Droge aarde kaatst ongeveer 14% van het licht terug, natte aarde 8 tot 9%. (Ångström, Geogr. Ann. 1925).

gekomen. Dompel echter die bleker gedeelten onder water, schud ze, druk er op: er komen luchtbellen uit, en tevens worden ze donkerder.

### 225. De mens in het landschap.

'Ik zie uit mijn raam een man aan de vloer van de gaanderij werken, naakt tot aan het middel. Als ik zijn kleur vergelijk met die van de buitenmuur, merk ik op hoezeer de halftinten van het vlees gekleurd zijn vergeleken met die van de levenloze stof. Hetzelfde heb ik gisteren op de Place St. Sulpice opgemerkt, waar een kwajongen op een der standbeelden van de fontein geklauterd was, in 't zonlicht. Mat oranje voor het vlees, het felste violet voor de schaduwovergangen, en gouden reflexen in de schaduwen die naar de grond toe gekeerd zijn. Oranje en violet overheersten afwisselend of mengden zich dooreen. De gouden tint had iets groens. Het vlees heeft zijn ware kleur slechts in de Zon en de open lucht. Laat een man zijn hoofd uit het raam steken: hij is helemaal anders dan binnenshuis. Vandaar de dwaasheid der atelierstudie, waar men zijn best doet om die vervalste kleur weer te geven.'
(*Delacroix, Journal*).

# Lichtgevende planten, dieren, gesteenten.[1)]

## 226. Glimwormen.

> *Vertel aan B. dat ik over de Alpen en de Apenijnen ben getrokken; dat ik de 'Jardin des Plantes' heb bezocht; het museum dat door Buffon ingericht is; het Louvre, met zijn meesterstukken van de beeldhouw- en schilderkunst; het Luxembourg, met de werken van Rubens; dat ik een* Glimworm *heb gezien!!!*
> *Brief van Faraday aan zijn moeder* (*Life and Letters*, 1814, *blz*. 116).

Glimwormen zijn eigenlijk geen wormen, maar kevers; de wijfjes zijn ongevleugeld en kruipen, de mannetjes vliegen rond. In ons land komen twee soorten voor: de kleine glimworm (Lampyris splendidula, mannetje 8 mm, wijfje 9 mm lang), en de grote glimworm (Lampyris noctiluca; mannetje 11 mm, wijfje 16 mm). De lichtgevende orgaantjes bevinden zich aan de twee achterste ringen van het achterlijf; ze bevatten een stof, die bij oxydatie licht geeft door chemiluminescentie. De uitgezonden stralen hebben juist de kleur waarvoor onze ogen het gevoeligst zijn en bevatten geen infrarood, zodat deze kever werkelijk een ideale lichtbron zou kunnen genoemd worden.... als hij maar wat helderder schijnen wilde!

## 227. Het lichten der zee.

Het lichten der zee wordt in onze gewesten voornamelijk veroorzaakt door miljoenen kleine zeediertjes van de soort *zeevonk* (Noctiluca miliaris). Het zijn protozoa van de groep der zweepdiertjes, ongeveer 0,2 mm groot, dus nog net met het blote oog als afzonderlijke stipjes te zien. Ze geven slechts licht als er zuurstof in het water opgelost is, hetgeen door roeren, breken der

1) H. Molisch: Leuchtende Pflanzen (Jena, 1904).

golven, enz. bevorderd wordt. Een bepaalde stof wordt daarbij geoxydeerd, maar niet merkbaar verhit; ook vertoont het licht niet dezelfde samenstelling als dat van een gloeiend lichaam, het is geen 'temperatuurstraling' maar 'chemiluminescentie'[1]: het bevat noch ultraviolette, noch infrarode stralen, maar alleen de kleuren die op ons oog een sterke lichtindruk maken, zoals vooral geel en groen.

Prachtig kan men soms het lichten der zee zien op een onweerachtige zomeravond, na een warme dag. In de lichtschijn der lantarens van de dijk of van de hotels is er altijd enige twijfel of men nu het eigenlijke lichten der zee ziet, of veeleer het witte schuim der golfkammen; helemaal mooi is het verschijnsel dan ook alleen in de volledig duistere nacht. Kan men niet in die gunstige omstandigheden waarnemen, dan trekt men kousen en schoenen uit en gaat met de hand *onder water* heen en weer roeren: men ziet wolken van licht, terwijl men toch zeker weet, geen schuim te hebben gemaakt; nog mooier is het lichten om uw benen, want u ziet dit in een zo dikke laag.

Als het lichten niet duidelijk waar te nemen is, ziet men bij het roeren toch nog dikwijls hier en daar een afzonderlijk vonkje, dat ongeveer een sekunde licht geeft en dan uitdooft. Wat is de naam 'zeevonk' goed gekozen! Schep een emmertje zeewater en breng dat in de volledige duisternis; zelfs op ongunstige dagen kunt u iets van het lichten zien door het water in een kom uit te gieten, of door er enkele druppels alkohol, formol of zuur aan toe te voegen en aldus de mikroskopische wezentjes te prikkelen. Doe het lichtende water in een glas: de diertjes verzamelen zich bij het oppervlak; stoot tegen het glas: ze geven licht tengevolge van de mechanische trilling, als u de proef herhaalt wordt het lichtgeven geleidelijk zwakker.

> Ontwerp een schaal voor het lichten der zee!
> Oefen op koude avonden, als er zeker *geen* lichten te zien is, en onderzoek hoe de schuimende kammen er uitzien; u zult dan op gunstige avonden het verschil kunnen waarnemen.

Als u eens een zeereis maakt, vooral in de tropen, moet u op een donkere avond eens aan de voor- of achtersteven van het schip gaan staan, waar de schijn der lampen niet meer stoort. U ziet dan bijna voortdurend lichtvonken voorbijschieten: het zijn allerlei verschillende zeediertjes die een weinig licht geven.

1) Het woord 'fosforescentie' betekent iets geheel anders en worde nooit voor het lichten der zee gebruikt!

## 228. Lichtgevend hout. Lichtgevende bladeren.

Soms ziet men op een warme zomernacht, in het vochtige bos, hoe rottend hout zwak licht geeft; dit wordt veroorzaakt door draden van de honigzwam (Armillaria mellea), die er zich overal in genesteld hebben.

Zoek 's winters of in de lente boomstronken, waarvan de schors gemakkelijk van het hout te scheiden is, en waarop zich donkere, vertakte draden bevinden. Leg stukken van die stronken tussen vochtig mos en breng ze naar huis; bewaar ze in de schaduw, onder een klok: 's avonds of na een paar dagen beginnen ze licht te geven.

De dorre bladeren van de beuk en van de eik, die zich hier en daar in dikke lagen hebben verzameld en half verteerd zijn, geven in een bepaald stadium der ontbinding duidelijk licht. Zoek lagen van 10-30 cm dik; neem niet de bovenste losse bladeren, maar die, welke dieper liggen, dicht op elkaar, met geel-witte vlekken, en breng een handvol daarvan in een geheel donkere kamer. Het lichtgeven is hier te wijten aan zwamdraden van voorlopig nog onbekende soort.

## 229. Kat-ogen in de nacht.[1)]

Het is bekend welk een fel licht ze schijnen uit te stralen. Toch is het in werkelijkheid slechts teruggekaatst licht, en wel *gericht teruggekaatst licht*, zoals bij een fietsreflektor of bij de heiligenschijn op bedauwd gras (§ 168): de stralen die in het hoornvlies binnendringen, vormen een zeer helder beeldje op de oog-achtergrond, die zendt nu weer zijn stralen terug door hetzelfde hoornvlies, en de lichtbundel komt ongeveer in dezelfde richting terug waarin hij inviel. Wil het verschijnsel duidelijk zijn, dan moet men ervoor zorgen dat de lamp, het oog van de kat en dat van de waarnemer zich op één rechte lijn bevinden; dit bereikt men door een zaklantaren op de hoogte van de ogen te houden: de schittering der katogen is dan nog op 80 m afstand zichtbaar. U zult verwonderd zijn te merken, hoeveel katten haar ogen op u gericht hebben!

Bij de hond is de kleur roodachtig; ook schaap, konijn, paard vertonen het lichten der ogen, de mens echter niet.

1) Nat. **88**, 377, 1912.

## 230. Fluorescentie van plantensappen.

Werp in een glas water enkele stukjes schors of twijgen van de veelgekweekte manna-es (Fraxinus ornus)[1]. Het sap der plant vermengt zich met het water, en dit gaat nu een eigenaardige blauwe weerschijn vertonen, het mooist te zien als u met een bolle lens (brilleglas, loupe) een kegel zonnestralen door de vloeistof werpt. Het verschijnsel is daaraan te wijten, dat de vloeistof het violette en het (voor ons onzichtbare) ultraviolette licht der Zon opslorpt, en daarvoor in de plaats blauwe stralen uitzendt. Een dergelijke omzetting noemen we 'fluorescentie'.

Twijgen van de paardekastanje vertonen het verschijnsel ook, maar dan moet men enkele druppels ammonia aan de vloeistof toevoegen.

## 231. Fosforesceren van ijs en sneeuw.

Er is een oud verhaal, dat ijsvelden, die lang door de Zon bestraald zijn geweest, een zwak licht geven in de nacht. Ook sneeuw, verscheidene graden onder het vriespunt bestraald met zonlicht, zou licht geven als men hem in een donkere kamer brengt.

Wie beproeft dit?

## 232. Lichtgeven van gesteenten.

Een enkele maal kan men waarnemen hoe de hoeven van een paard zo krachtig tegen de straatkeien slaan, dat er vonken uit spatten.

Zoek vuurstenen op de heide; het zijn bruinachtige keien, aan de randen een weinig doorzichtig, meestal zacht afgerond, zonder kristallijne bouw. Sla twee dergelijke vuurstenen tegen elkaar, op een zo donker mogelijk plekje: er ontstaan vonken, men ruikt een eigenaardige lucht. De waarneming is ook wel met andere keien uit te voeren. De vonken ontstaan, doordat bij de botsing enkele stofjes weggeslingerd worden en door de stoot zo sterk verhit, dat ze gaan gloeien; daarbij komen bepaalde gassen vrij, die men ruikt.

1) Dufour, C.R. **51**, 31, 1860. In deze verhandeling wordt de proef als uiterst eenvoudig beschreven. De takjes waarover ik beschikte vertoonden echter het verschijnsel niet.

## 233. Dwaallichtjes.[1)]

'....*En ik zou willen vragen: hoeveel natuuronderzoekers zijn er thans nog, die in donkere, nevelachtige herfstavonden buiten rondlopen door wind en moeras? Aan de schrijftafel of in de museumkast kan men natuurlijk geen dwaallichtjes waarnemen*.'
*K. Floericke, Kosmos*, **5**, 270, 1908.

Het volk vertelt van dwaallichtjes die als vlammetjes huppelen over het kerkhof, of den reiziger naar de moerassen lokken.... Hun bestaan is echter geen sprookje! De beroemde sterrekundige Bessel en andere uitstekende waarnemers hebben ze gezien en beschreven; de moeilijkheid is, dat het verschijnsel in allerlei zeer verschillende vormen kan optreden.

Men vindt dwaallichtjes op moerassen of plaatsen waar veen afgegraven wordt, langs dijken; een enkele maal zag men ze op de vochtige, pas gemeste grond ener groentenkwekerij, wanneer men op de aarde stampte; op moddersloten of in riolen als men er in roert. Ze komen meer voor in de zomer en in regenachtige, warme herfstnachten, dan in het koude jaargetijde. Ze zien er uit als kleine vlammetjes, van 1 tot 12 cm hoog en niet meer dan 4 cm breed; soms zitten ze rechtstreeks op de grond, andere malen zweven ze een 10-tal cm er boven. Dat ze heen en weer zouden huppelen schijnt onjuist; wel doven ze soms snel uit, terwijl een ander vlammetje in de buurt ontstaat, wat de indruk van vlugge voortbeweging kan maken; een enkele maal worden ze enige decimeters ver door de wind voortgeblazen eer ze uitdoven. In vele andere gevallen is waargenomen dat een dwaallicht urenlang rustig brandde, soms de hele nacht en zelfs bij dag. Soms hoort men een knalletje als een nieuwe vlam ontbrandt. De kleur wordt afwisselend opgegeven als geel, rood of blauw. In vele gevallen was er geen merkbare warmte te voelen als men de hand in het vlammetje bracht; een wandelstok met koperen beslag werd een kwartier in de vlam gehouden, en voelde niet merkbaar warm aan; dorre rietstengels brandden niet. In andere gevallen kon men papier en werk aan het dwaallicht aansteken. Meestal heeft men geen geur waar kunnen nemen, in sommige gevallen een zwakke zwavellucht.

1) Ann. d. Phys. **89**, 620, 1853. - Samenvattend artikel van W. Müller-Erzbach in Abh. naturw. Ver. Bremen, **14**, 217, 1897. - Album der Natuur, 1897. - Met. Zs. **17**, 505, 1900. - Kosmos, **5**, 270, 1908. - Wetter, **20**, 46, 1903 en **33**, 18 en 71, 1916.

Waaruit bestaan die geheimzinnige vlammetjes? Niemand heeft nog het gas kunnen opvangen dat hier ontbrandt. Men heeft gedacht aan fosforwaterstof, dat uit zichzelf aan de lucht ontvlamt; het schijnt dat een mengsel van $PH_3$ met $H_2S$ zonder rookringen en zonder geur ontbrandt en dus het natuurverschijnsel tamelijk goed nabootst. Dergelijke gassen kunnen stellig ontstaan door ontbinding van rottende stoffen. De waargenomen vlam is een vorm van chemiluminescentie, en haar lage temperatuur is een eigenaardigheid die bij tal van dergelijke reacties voorkomt.

Het zou zeer wenselijk zijn, in onze lage en moerassige streken meer waarnemingen omtrent dwaallichtjes te doen!

## 234. Enkele wenken voor het fotograferen van natuurverschijnselen.

Bij elk optisch verschijnsel, hetwelk wij in dit boek besproken hebben, vragen we ons af, of het niet op de gevoelige plaat vastgelegd kan worden. Het is verrassend, hoe veel er in deze richting te doen is, en hoe weinig er nog gedaan werd! In de meeste gevallen is een gewone camera voldoende; wil men met een statief werken, dan dient dit voorzien te zijn van een kogelgewricht, dat men voor een paar gulden kopen kan, en dat de mogelijkheid geeft de camera onder een willekeurige helling te richten. Voor verschijnselen zoals de regenboog en de halo is een grote hoek-objektief nodig. Voor het opnemen van kransen en vervormingen van de ondergaande Zon moet de brandpuntsafstand van de camera tenminste 30 cm bedragen.

Gebruik *altijd* platen of films met een anti-halo laag, en liefst ortho- of panchromatisch! Voor landschappen met sneeuw, rijp, bloeiende bomen, wolken, verre gezichteinders: een geelfilter met ortho- of panchromatische platen of films. Vermijd het schijnen van de Zon in uw objektief, door een kokertje voor de lens aan te brengen.

Fotografeer het landschap liefst bij niet te hoge Zon. Onderscheid het effekt bij belichting van schuin voren; of van schuin achter; of van omhoog (vgl. § 223).

De belichtingstijd varieërt van 1/100 sec. uit een vliegtuig tot 1 uur bij maneschijn.

Ontwikkel in 't algemeen met een metol-hydrochinon-ontwikkelaar.

## 235. Het meten van hoeken in 't vrije veld.

a. Schat eens de hoogten van sterren zonder enig hulpmiddel[1]. Bepaal daartoe eerst het *zenith*; keer u om, en zie of u het dan nog op dezelfde plaats zoudt aanwijzen. Bepaal nu de hoogte $45^\circ$, dan $22_5^\circ$ en $67_5^\circ$, enz. Er is een neiging om het hoofd niet

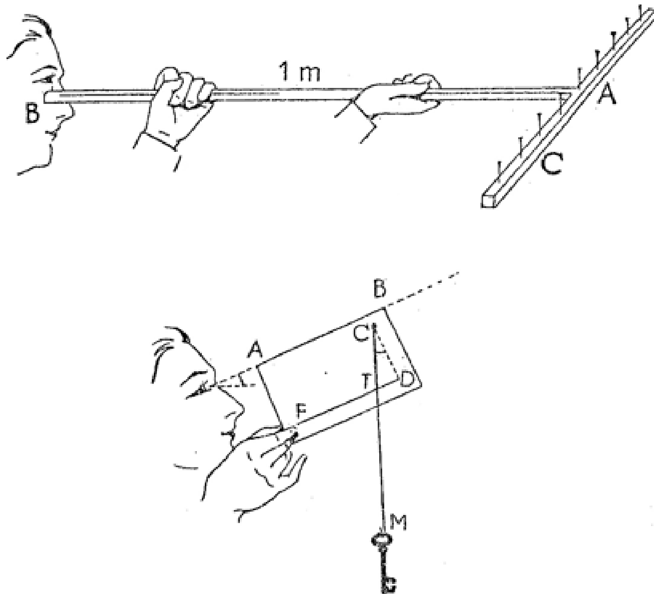



Fig. 161. Eenvoudige hulpmiddelen voor het schatten van hoeken.

genoeg achterover te buigen (vgl. § 109). Een *goed* waarnemer maakt geen fouten groter dan $3^\circ$.

b. Prik drie spelden A, B, C in een plankje of in een briefkaart, zò dat de gezichtslijnen BA, BC de te meten hoek afbakenen. Het plankje moet vast opgesteld zijn, op een tafel liggen of tegen een boom gespijkerd zijn. Trek daarna de lijnen BA, BC, en meet hun hoek met een gradenboog.

c. Twee latten, de ene van 1 meter lengte, de andere loodrecht daarop bevestigd; in deze laatste, spijkers of spelden op vaste afstanden van elkaar (fig. 161*a*). Houd deze soort hark met de

1) A.A. Nijland, A.N. **160**, 258, 1902.

steel B tegen uw jukbeen gedrukt; als nu de spijkers A en C met de twee beschouwde punten schijnen samen te vallen, is AC/BA de gevraagde hoek in 'radialen'. Eén radiaal = 57°. Als b.v. AC = 7 cm, is AC/BA = 0,07 rad. = 4°.

*d.* We strekken de arm recht vóór ons uit en spreiden de vingers van de hand zo ver mogelijk uiteen; dan ziet ons oog tussen de top van de duim en van de pink een hoek van ongeveer 20°. Houd met gestrekte arm een latje loodrecht op uw blikrichting, en meet (in cm) hoe groot de afstand *a* schijnt te zijn tussen de twee beschouwde punten: de hoek bedraagt dan ongeveer *a* graden. Een nauwkeuriger bepaling verkrijgt men, door bij zichzelf de afstand latje - oog precies te meten.

*e.* Voor het meten van hoeken boven de gezichteinder is er een eenvoudig hulpmiddel dat een nauwkeurigheid van 0,5° geeft.[1)] Neem een rechthoekig stuk karton, prik daarin een gaatje C, en laat daardoor een draad CM hangen, op een of andere wijze bezwaard en als schietlood dienend (fig. 161). De waarnemer richt de zijde AB nauwkeurig naar de boomtop waarvan de hoogte gemeten wordt, zwenkt het karton even, zodat de draad eerst vrij hangt en dan zacht tegen het karton aandrukt. Op het karton zijn de lijnen CD ⊥ AB en DF ∥ AB getrokken, de eerste liefst 10 cm lang. De hoek DCM is nu gelijk aan de hoek van AB met het horizontale vlak, hij is te meten met een gradenboog, of te berekenen uit zijn tangens TD/CD; voor kleine hoeken is

$$\frac{\text{TD (in cm)}}{10}$$

gelijk aan de hoek in radialen.

Vgl. § 1 en § 120.

1) Science, **66**, 507, 1927. De Harvard - sterrewacht heeft zulk een toestelletje gestuurd aan haar vrijwillige meteoor-waarnemers.

## Lijst van enkele afkortingen, gebruikt bij het aanhalen van tijdschriften.

Abh. = Abhandlungen.
Ann. soc. mét. France = Annuaire de la Société météorologique de France.
Ann. = Annalen, Annales.
Arch. = Archives.
A.N. = Astronomische Nachrichten.
Beitr. = Beiträge.
Ber. = Berichte.
Bull. = Bulletin.
C.R. = Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris.
Eder's Jahrb. = Eder's Jahrbuch für Photographie und Reproduktionstechnik.
Geogr. = Geographical.
Geogr. Ann. = Geografiska Annaler.
H. en D. = Hemel en Dampkring.
Helv. Phys. Acta = Helvetica Physica Acta.
J.R.A.S. Can. = Journal of the Royal Astronomical Society of Canada.
J.O.S.A. = Journal of the Optical Society of America.
Journ. Frankl. Inst. = Journal of the Franklin Institute.
Mem. spett. it. = Memorie degli spettroscopisti italiani.
Met. = Meteorological, Meteorologische, Meteorologie.
Mag. = Magazine.
Mitt. Ver. Fr. d. Astron. = Mitteilungen des Vereins der Freunde der Astronomie enz.
M.N. = Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.
M.W.R. = Monthly Weather Review.
Nat. = Nature.
Naturwiss. = die Naturwissenschaften.
Nov. Act. Leop. = Nova Acta Academiae Leopoldinae.
Onweders, enz. = Onweders en Optische Verschijnselen in Nederland.
P.A.S.P. = Publications of the Astronomical Society of the Pacific.
Peterm. Mitt. = Petermann's geographische Mitteilungen.
Phil. Mag. = Philosophical Magazine.
Philos. = Philosophical, Philosophie.
Phys. = Physikalische, Physik, Physical.
Pogg. Ann. = Annalen der Physik, Poggendorff'sche Reihe.
Proc. Ind. Ass. = Proceedings of the Indian Association for the Advancement of Science.
Proc. R. Soc. = Proceedings of the Royal Society of London.
Quart. Journ. = Quarterly Journal of Theoretical and Applied Meteorology.
Rep. Brit. Ass. = Report of the British Association.
Rev. = Review.
Smiths. misc. Coll. = Smithsonian miscellaneous Collection.
Trans. = Transactions.
Verh. = Verhandelingen. Verhandlungen.
Versl. enz. = Verslagen der Kon. Akademie van Wetenschappen te Amsterdam.
Vid. Selsk. Forh. = Videnskabs Selskabets Forhandlinger.
Zs. = Zeitschrift.
De litteratuur uit Ruskin is aangehaald naar de Library Edition (London 1903-1912); de Romeinse cijfers zijn de nummers der delen.

## Woordenlijst.